Energetska oporaba otpada pod utjecajem europske legislative

Tomić, Tihomir

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:857953

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Tihomir Tomić

ENERGETSKA OPORABA OTPADA POD UTJECAJEM EUROPSKE LEGISLATIVE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Tihomir Tomić

ENERGETSKA OPORABA OTPADA POD UTJECAJEM EUROPSKE LEGISLATIVE

DOKTORSKI RAD

Mentor:
prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Zagreb, 2019.

University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Tihomir Tomić

ENERGY RECOVERY OF WASTE UNDER THE INFLUENCE OF EUROPEAN LEGISLATION

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Zagreb, 2019.

BIBLIOGRAFSKI PODACI

UDK: 628.477.6.

Ključne riječi: gospodarenje komunalnim otpadom; energetska oporaba otpada; praćenje materijalnih i energetskih tokova; legislativa o gospodarenju otpadom; socioekonomska analiza; analiza održivosti; energetska analiza; kružno gospodarstvo; integracija sustava; višekriterijsko odlučivanje; uloga energije iz otpada

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarstvo

Institucija: Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor: Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Broj stranica: 214

Broj slika: 92

Broj tablica: 63

Broj referenci: 250

Datum obrane: 27.02.2019.

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada:

Prof. dr. sc. Davor Ljubas – Predsjednik

Doc. dr. sc. Tomislav Pukšec – član

Prof. dr. sc. Igor Sutlović – vanjski član

Arhiva: Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAHVALA

Istraživanje prezentirano u ovome doktorskom radu je u cijelosti provedeno na Zavodu za energetska postrojenja, energetiku i okoliš Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu kroz projekt Hrvatske zaklade za znanost, Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti.

Prije svega, želio bih se zahvaliti svome mentoru, profesoru Danielu R. Schneideru na pruženoj prilici kao i svim savjetima i konstruktivnim kritikama kojima me usmjeravao u pravome smjeru proteklih godina. Posebno bih se htio zahvaliti članovima povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada, profesorima Davoru Ljubasu i Igoru Sutloviću te docentu Tomislavu Pukšecu na uloženom vremenu i trudu. Također, zahvaljujem SDEWES centru na pomoći prilikom prikupljanja podataka i publiciranju rezultata istraživanja, kao i mogućnosti sudjelovanja u programskom odboru (LOC) niza SDEWES konferencija čime su mi pružili priliku za uspostavu kontakata s vrsnim znanstvenicima te praćenje aktualnih tema u području održivog razvoja energetike, voda i okoliša. Posebna zahvala ide profesoru Nevenu Duiću na motivaciji koju razvija kod svojih studenata i suradnika za znanstvenoistraživački rad u području održivog razvoja. Zahvaljujem se i kolegama i prijateljima iz Powerlaba te s 8. kata, na tehničkoj i moralnoj podršci te plodonosnim diskusijama i zajedničkom radu. Osim toga, zahvaljujem se i svim svojim nastavnicima i profesorima na pruženom znanju tijekom školovanja i temeljima za moj daljnji akademski, stručni i znanstveni napredak.

Veliko hvala mojim prijateljima na pružanju podrške, slušanju mojih problema te odvraćanju misli s njih. Konačno, i najvažnije, veliko i istinsko hvala mojoj obitelji, majci Marjani, ocu Mladenu, bratu Hrvoju sa suprugom Silvijom, nećacima Gabrielu i Mihaelu te nećakinji Rafaeli, na bezuvjetnoj ljubavi, podršci, razumijevanju i strpljenju koje ste mi pružili tijekom svih ovih godina. Hvala vam na svakoj riječi, osmjehu, zagrljaju, ali i kritici, jer su me oni doveli do ovdje gdje jesam.

Tihomir Tomić, 14.12.2018.

„Non quia difficilia sunt non audemus,
sed quia non audemus, difficilia sunt.“
– Lucius Annaeus Seneca

SADRŽAJ

BIBLIOGRAFSKI PODACI I

ZAHVALA II

SADRŽAJ IV

POPIS SLIKA VII

POPIS TABLICA XII

NOMENKLATURA XV

SAŽETAK XVIII

PROŠIRENI SAŽETAK XX

EXTENDED ABSTRACT XXVII

KLJUČNE RIJEČI XXXIV

KEY WORDS XXXIV

1. UVOD 1

1.1. Problem materijalne ovisnosti 1

1.2. Problem energetske ovisnosti 4

1.3. Problem zbrinjavanja otpada 6

1.4. Rješavanje problema na razini Europske unije 8

1.4.1. Materijalna strana 8

1.4.2. Gospodarenje otpadom 10

1.4.3. Energetska strana 13

2. MOTIVACIJA, PITANJA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA 16

2.1. Motivacija i istraživačko pitanje 16

2.2. Ciljevi istraživanja 17

2.2.1. Pregled područja istraživanja 17

2.2.1.1. Analiza životnog ciklusa 19

2.2.1.2. Energetska analiza ... 21
2.2.1.3. Održivost i utjelovljena energija ... 23
2.2.1.4. Socioekonomska strana ... 25
2.2.2. Nedostaci u dosadašnjim istraživanjima ... 29
2.2.3. Cilj istraživanja i hipoteza ... 31
3. ZNANSTVENI DOPRINOS ... 33
4. STRUKTURA RADA ... 37
5. METODOLOGIJA ... 38
5.1. Definiranje sustava ... 38
5.1.1. Granice sustava i analize ... 38
5.1.2. Analizirani sustav ... 39
5.1.3. Modeliranje tehnologija ... 42
5.2. Modeliranje varijabilnih vrijednosti ... 47
5.2.1. Količina i sastav otpada ... 47
5.2.2. Ogrjevna vrijednost ... 50
5.2.3. Prinos biometana ... 50
5.3. CED analiza – analiza utjecaja ... 53
5.4. Analiza smanjenja utjelovljene energije – analiza održivosti ... 61
5.5. Socioekonomska analiza ... 63
5.6. Multikriterijsko rangiranje ... 69
5.6.1. MCDM pristup ... 70
5.6.1.1. PROMETHEE metoda ... 71
5.6.1.2. GAIA metoda ... 74
5.7. Definiranje studije slučaja i scenarija ... 75
5.7.1. Definiranje studije slučaja i zavisnih ulaznih veličina ... 75
5.7.2. Definiranje scenarija ... 79

5.7.2.1. Scenarij: Postojeći sustav 80
5.7.2.2. Scenarij: Plan 83
5.7.2.3. Scenarij: Materijalna oporaba 84
5.7.2.4. Scenarij: Energetska oporaba 86
6. REZULTATI I DISKUSIJA 88
6.1. Maseni tokovi otpada 88
6.2. Energetska potrošnja 91
6.3. Materijalna proizvodnja 102
6.4. Energetska proizvodnja 103
6.5. CED analiza - Analiza utjecaja 107
6.5.1. Povrat primarne energije 107
6.6. Analiza smanjenja utjelovljene energije – Analiza održivosti 116
6.6.1. Zadovoljavanje energetskih potreba 117
6.6.2. Analiza utjecaja na utjelovljenu energiju 126
6.7. Socioekonomska analiza 141
6.8. Multikriterijsko rangiranje 154
7. ZAKLJUČAK 168
8. POPIS LITERATURE 178
9. PRILOG 204
10. ŽIVOTOPIS 211

POPIS SLIKA

Slika 1. Uvoz i izvoz prema kategoriji materijala, EU-28, 2016 (tona po stanovniku) [4]..... 1

Slika 2. Ovisnost o uvozu prema glavnoj kategoriji materijala, EU-28, 2000 - 2016 (% uvoza EU-a u ukupnim materijalima dostupnim gospodarstvu EU-28) [7] 2

Slika 3. EU-28 prerađivačka industrija - izvor odabranih sirovina u 2014 (udio prema načinu dobave) [8] 3

Slika 4. Uvoz i izvoz prema glavnoj kategoriji fosilnih goriva, EU-28, 2016 (energija u EJ) [9] 4

Slika 5. Energetska ovisnost po vrsti goriva, EU-28, 1990-2015 (energija kao tona ekvivalentne nafte) [10] 5

Slika 6. Omjer Europske ovisnosti o uvozu energije, EU-28, 1990-2016. (Omjer uvoza i bruto unutarnje potrošnje u %) [11] 6

Slika 7. Komunalni otpad po tehnologijama gospodarenja (u tonama po godini) [20] 7

Slika 8. Faze razmatranog sustava i njegove granice 39

Slika 9. Tehnologije sortiranja otpada te primjer njihovog povezivanja u sustav 40

Slika 10. Transformacije proizvedenih energetskih vektora 41

Slika 11. Ulazni i izlazni tokovi tehnologija definirani LCI UPR setom podataka 42

Slika 12. Primjer definicije tržišne aktivnosti u Ecoinvent bazi 44

Slika 13. Podaci o iskoristivosti postrojenja za TOO 45

Slika 14. Greška ekstrapolacije količine generiranog komunalnog otpada – Poznan, Poljska [175] 48

Slika 15. Dijagrami linearne regresije – korelacija CED analize s drugim LCA metodama procjene utjecaja na okoliš s 90 postotnim intervalima točnosti podudaranja 54

Slika 16. Proširenje sustava gospodarenja otpadom *i* (a), koji proizvodi neke komplementarne materijalne (*Mo,i*) i energetske (*Eo,i*) proizvode te prouzrokuje određene utjecaje (*imp,i*), s proizvodnim sustavom *j* koji proizvodi iste proizvode (b) te rezultirajući prošireni sustav (c) 56

Slika 17. Regresijska analiza CAPEX funkcija za različite tehnologije pročišćavanja bioplina 65

Slika 18. Regresijska analiza OPEX funkcija za različite tehnologije pročišćavanja bioplina 65

Slika 19. Regresijska analiza investicijskih troškova kogeneracijskih postrojenja za TOO.... 66

Slika 20. Funkcija kriterija s linearnom preferencijom i zadanim područjem indiferencije.... 73

Slika 21. Scenarij: Postojeći sustav 81

Slika 22. Analizirane varijante po pitanju korištenja bioplina 82

Slika 23. Scenarij: Plan 84

Slika 24. Scenarij: Materijalna oporaba 85

Slika 25. Scenarij: Energetska oporaba 86

Slika 26. Ukupna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima 99

Slika 27. Potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima na lokalnoj razini 100

Slika 28. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Postojeći sustav 108

Slika 29. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Plan 108

Slika 30. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Materijalna oporaba 109

Slika 31. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Energetska oporaba 109

Slika 32. Iznos CED indikatora povrata primarne energije (PER) u MJ 112

Slika 33. Vrijednost indeksa PERI po scenarijima 113

Slika 34. Usporedba vrijednosti indeksa PERI za sve razmatrane scenarije i varijante 116

Slika 35. Proizvodnja i potrošnja električne energije za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju 118

Slika 36 Proizvodnja i potrošnja toplinske energije za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju 118

Slika 37. Proizvodnja i potrošnja električne energije za varijantu transformacije bioplina u biometan 119

Slika 38. Proizvodnja i potrošnja toplinske energije za varijantu transformacije bioplina u biometan 120

Slika 39 Proizvodnja i potrošnja metana za varijantu transformacije bioplina u biometan ... 120

Slika 40. Proizvodnja i potrošnja električne energije za varijantu transformacije bioplina u SPP 121

Slika 41. Proizvodnja i potrošnja toplinske energije za varijantu transformacije bioplina u SPP 122
Slika 42. Proizvodnja i potrošnja goriva za varijantu transformacije bioplina u SPP 122
Slika 43. Faktori pokrivanja potrošnje energetskih vektora za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju..... 123
Slika 44. Faktori pokrivanja potrošnje energetskih vektora za varijantu transformacije bioplina u biometan 124
Slika 45. Faktori pokrivanja potrošnje energetskih vektora za varijantu transformacije bioplina u SPP 124
Slika 46. Usporedba ukupnih odnosa proizvodnje i potrošnje na razini primarne energije po varijantama – razina sustava 125
Slika 47. Usporedba ukupnih odnosa proizvodnje i potrošnje na razini primarne energije po varijantama – lokalna razina 125
Slika 48. Utjelovljena energija u materijalima – Postojeći sustav (Danas) 128
Slika 49. Utjelovljena energija u materijalima – Postojeći sustav (2020) 128
Slika 50. Utjelovljena energija u materijalima – Postojeći sustav (2030) 128
Slika 51. Utjelovljena energija u materijalima – Plan (Danas) 129
Slika 52. Utjelovljena energija u materijalima – Plan (2020) 130
Slika 53. Utjelovljena energija u materijalima – Plan (2030) 130
Slika 54. Utjelovljena energija u materijalima – Energetska oporaba (Danas)..... 131
Slika 55. Utjelovljena energija u materijalima – Energetska oporaba (2020)..... 131
Slika 56. Utjelovljena energija u materijalima – Energetska oporaba (2030)..... 131
Slika 57. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba (Danas)..... 132
Slika 58. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba (2020)..... 132
Slika 59. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba (2030)..... 132
Slika 60. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba s AD (Danas)..... 133
Slika 61. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba s AD (2020)..... 133
Slika 62. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba s AD (2030)..... 134
Slika 63. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Postojeći sustav – varijanta proizvodnje biometana 134

Slika 64. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Energetska oporaba – varijanta proizvodnje biometana 135
Slika 65. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Materijalna oporaba s AD – varijanta proizvodnje biometana 135
Slika 66. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Postojeći sustav – varijanta proizvodnje SPP 136
Slika 67. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Energetska oporaba – varijanta proizvodnje SPP 136
Slika 68. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Materijalna oporaba s AD – varijanta proizvodnje SPP 137
Slika 69. Trošak sustava – Postojeći sustav 143
Slika 70. Trošak sustava - Plan 143
Slika 71. Trošak sustava – Energetska oporaba 144
Slika 72. Trošak sustava – Materijalna oporaba 144
Slika 73. Trošak sustava – Materijalna oporaba s AD 144
Slika 74. Analiza odnosa prihoda i troškova – Postojeći sustav 146
Slika 75. Analiza odnosa prihoda i troškova – Plan 147
Slika 76. Analiza odnosa prihoda i troškova – Energetska oporaba 148
Slika 77. Analiza odnosa prihoda i troškova – Materijalna oporaba 148
Slika 78. Analiza odnosa prihoda i troškova – Materijalna oporaba s AD 149
Slika 79. Trošak sustava – Materijalna oporaba – uključen trošak termičke obrade GIO 150
Slika 80. Trošak sustava – Materijalna oporaba s AD – uključen trošak termičke obrade GIO 150
Slika 81. Trošak sustava – Materijalna oporaba – uključen trošak termičke obrade GIO 151
Slika 82. Trošak sustava – Materijalna oporaba s AD – uključen trošak termičke obrade GIO 151
Slika 83. Grafička usporedba rangiranja scenarija 159
Slika 84. Doprinosi po kriterijima – ukupni rezultati 160
Slika 85. Rezultati GAIA analize – ukupni rezultati 161

Slika 86. Analiza osjetljivosti promjene težinskog faktora za kriterij Povrat primarne energije (PPE) 164

Slika 87. Analiza osjetljivosti promjene težinskog faktora za kriterij Smanjenje utjelovljene energije (SUE) 165

Slika 88. Analiza osjetljivosti promjene težinskog faktora za kriterij Socioekonomska analiza (SEA) 166

Slika 89. Ukupna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima 206

Slika 90. Potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima na lokalnoj razini 207

POPIS TABLICA

Tablica 1. Utjecajni indikatori na rezultate projekcije količine i sastava generiranog komunalnog otpada 48
Tablica 2. Kemijski sastav otpada po frakcijama 50
Tablica 3. Funkcije ekonomskih veličina za postrojenja za separaciju i odlaganje komunalnog otpada 64
Tablica 4. Funkcije ekonomskih veličina za postrojenja za energetsku oporabu i energetske transformacije 67
Tablica 5. Tržišne cijene sekundarnih sirovina [221] 68
Tablica 6. Aktualni i prognozirani podaci o količinama skupljenog komunalnog otpada 77
Tablica 7. Aktualni i prognozirani podaci o sastavu skupljenog miješanog komunalnog otpada 77
Tablica 8. Energetska svojstva 78
Tablica 9. Karakteristike otpada koji su najčešće korišteni kao supstrati za AD [223] 79
Tablica 10. Ulazni tokovi otpada za tehnologije sortiranja po scenarijima 89
Tablica 11. Ulazni tokovi otpada za tehnologije energetske oporabe i odlaganja 90
Tablica 12. Ulazni tokovi otpada za tehnologije materijalne oporabe po scenarijima 91
Tablica 13. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Postojeći sustav - Danas 92
Tablica 14. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Postojeći sustav - 2020 92
Tablica 15. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Postojeći sustav - 2030 93
Tablica 16. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Plan - Danas 93
Tablica 17. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Plan - 2020 94
Tablica 18. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Plan - 2030 94
Tablica 19. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba - Danas 95
Tablica 20. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba - 2020 95
Tablica 21. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba - 2030 96
Tablica 22. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Energetska oporaba - Danas 96
Tablica 23. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Energetska oporaba - 2020 96
Tablica 24. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Energetska oporaba - 2030 97

Tablica 25. Dodatna neposredna potrošnja energenata sukladno razmatranim varijantama . 101

Tablica 26. Dodatna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim varijantama..... 101

Tablica 27. Proizvodnja sekundarnih materijala i komposta po scenarijima 102

Tablica 28. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – neposredna proizvodnja 103

Tablica 29. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Upotreba bioplina u kogeneracijskoj proizvodnji 104

Tablica 30. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u mrežu 105

Tablica 31. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u SPP 106

Tablica 32. Utjecaj promjene transportnih udaljenosti u GJ 111

Tablica 33. Razlike u iznosu CED indikatora povrata primarne energije (PER) u MJ, za transformacije bioplina u biometan te njegovog injektiranja u mrežu 114

Tablica 34. Razlike u iznosu CED indikatora povrata primarne energije (PER) u MJ, za transformacije bioplina u SPP i korištenja kao zamjensko gorivo 115

Tablica 35. Vrijednosti indeksa PERI za razmatrane varijante pretvorbe bioplina 116

Tablica 36. Utjelovljene energije materijala 126

Tablica 37. Smanjenje utjelovljene energije – varijanta kogeneracijske proizvodnje 138

Tablica 38. Smanjenje utjelovljene energije – varijanta proizvodnje biometana 139

Tablica 39. Smanjenje utjelovljene energije – varijanta proizvodnje SPP 140

Tablica 40. Proizvedena energija iz otpada – varijanta kogeneracijske proizvodnje..... 142

Tablica 41. Usporedba troškova analiziranih sustava 152

Tablica 42. Usporedba troškova analiziranih alternativnih varijanti transformacije bioplina 153

Tablica 43. Ulazni podaci u MCDM analizu – razdoblje Danas 154

Tablica 44. Ulazni podaci u MCDM analizu – razdoblje 2020..... 154

Tablica 45. Ulazni podaci u MCDM analizu – razdoblje 2030..... 154

Tablica 46. Ulazni podaci u MCDM analizu – ukupni rezultati 154

Tablica 47. Kvantitativni rezultati MCDM analize – razdoblje Danas..... 157

Tablica 48. Kvantitativni rezultati MCDM analize – razdoblje 2020..... 157

Tablica 49. Kvantitativni rezultati MCDM analize – razdoblje 2030 158

Tablica 50. Kvantitativni rezultati MCDM analize – ukupni 158

Tablica 51. Ulazni tokovi otpada za tehnologije sortiranja 204

Tablica 52. Ulazni tokovi otpada za tehnologije materijalne oporabe 204

Tablica 53. Ulazni tokovi otpada za tehnologije energetske oporabe i odlaganja 204

Tablica 54. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba a AD - Danas . 205

Tablica 55. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba s AD - 2020 ... 205

Tablica 56. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba s AD - 2030 ... 206

Tablica 57. Dodatna neposredna potrošnja energenata sukladno razmatranim varijantama . 207

Tablica 58. Dodatna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim varijantama 208

Tablica 59. Proizvodnja sekundarnih materijala po scenarijima 208

Tablica 60. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – neposredna proizvodnja 208

Tablica 61. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Upotreba bioplina u kogeneracijskoj proizvodnji 209

Tablica 62. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u mrežu 209

Tablica 63. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u SPP 210

NOMENKLATURA

Simbol	Jedinica	Opis
c	€	Investicijski trošak
C_c	€	Ukupni godišnji trošak prouzročen kapitalnim troškom određene tehnologije
CED	MJ	Indikator ukupne potražnje za energijom
$CEENEE$	MJ	Ukupna eksergijska ekstrakcija iz prirodnog okoliša
CF	kg CO_2	Klimatski otisak
c_j	€/kg	Otkupna cijena sekundarne sirovine *j*
c_k	€/J, €/kWh, €/m^3 ili €/kg	Otkupna cijena proizvedenog energetskog vektora iz tehnologije *k*
Co	€	Ukupni godišnji trošak pogona i održavanja određene tehnologije
E	J, kWh, m^3 ili kg	Energetski tok
EF	m^2 godina kg^{-1}	Ekološki otisak
EI	ecopoints	Ekološki indikator
E_i	J, kWh, m^3 ili kg	Energetski ulaz
E_o	J, kWh, m^3 ili kg	Energetski izlaz
E_p	J, kWh, m^3 ili kg	Proizvedeni energetski tok
EPS	ELU	Strategija ekološkog prioriteta
ES	UBA	Ekološka iscrpljenost
$H(d)$	-	Razlika kriterijskih funkcija alternativa
H_d	kJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost
imp	-	Utjecaj na okoliš
k	godina^{-1}	Brzina generiranja metana ili stopa raspada
L_0	m^3/Mg	Potencijal generiranja metana
M	Kg ili m^3	Materijalni tok
M_i	Mg	Masa prihvaćenog otpada u *i*-toj godini

M_i	Kg ili m^3	Materijalni ulaz
M_o	Kg ili m^3	Materijalni izlaz
m_o	Kg ili m^3	Materijalni izlaz razmatranog materijala
mo_uk	Kg ili m^3	Ukupni materijalni izlaz
M_p	Kg ili m^3	Proizvedeni materijalni tok
o	€/t	Trošak pogona i održavanja
p	-	Prag stroge preferencije
$P(a,b)$	-	Funkcija preferencije
P_{CH4}	%	Udio metana u bioplinu
PEC	MJ	Potrošnja primarne energije
PEP	MJ	Proizvodnja primarne energije
PER	MJ	Povrat primarne energije
PERI	%	Indeks povrata primarne energije
q	-	Prag indiferentnosti
Q_{CH4}	m^3	Količina generiranog biometana
Q_{CO2}	m^3	Količina generiranog ugljičnog dioksida
Q_{ukupno}	m^3	Ukupna količina generiranog bioplina
r	-	Kogeneracijski omjer proizvodnje električne i toplinske energije
R^2	%	Relativna mjera postotka zavisnosti zavisne varijacije
SE	-	Standardna greška regresijske analize
t	€	Ukupni troškovi
T	€	Trošak sustava koji podmiruju njegovi korisnici
t_{ij}	god	Starost *j*-otog dijela mase otpada *Mi* prihvaćene u *i*-toj godini
W	kg	Tok otpada
W_i	kg	Ulaz otpada
w_i	-	Težinski faktor kriterija *i*
W_o	kg	Izlaz otpada
W_p	kg	Proizvedeni otpadni tok

x	t/god	Ulazni tok otpada u ekonomskim funkcijama
x	t/god	Ulazna količina otpada u ekonomskim funkcijama
y	m^3/h	Ulazni tok bioplina u ekonomskim funkcijama
z	m^3/h	Ulazni tok SPP u ekonomskim funkcijama
η_{ukupno}	%	Ukupna iskoristivost postrojenja
$\Pi(a, b)$	-	Višekriterijski indeks preferencije
Φ	-	Pokazatelj ranga razmatranog scenarija
Φ^-	-	Ulazni tok dominacije nad predmetnom aktivnosti
Φ^+	-	Izlazni tok dominacije predmetne aktivnosti

SAŽETAK

Ovisnost o uvozu sirovina te utjecaj na okoliš predstavljaju glavne probleme koji definiraju put razvoja cjelokupnog europskog gospodarstva. Europska unija nastoji doskočiti ovim problemima kroz stimuliranje niskougljičnog, održivog, konkurentnog i sirovinski učinkovitog gospodarstva. Razvoj gospodarstva u ovome smjeru moguće je postići kroz povećanje održivosti proizvodnje promoviranjem simbioza industrija te uspostave šireg kružnog gospodarstva što Europska unija promovira kroz strateške planove za razvoj gospodarstva i legislativni okvir, čime je definiran i pristup "zatvaranja petlje". Integrirani sustav gospodarenja otpadom i njegove oporabe, ne samo da može pomoći pri „zatvaranju petlje“ na materijalnoj strani, kroz uporabu sekundarnih sirovina u proizvodnji sekundarnih materijala čime se skraćuje proizvodni lanac, nego i na energetskoj strani. Na ovaj način energija iz otpada se koristi za (djelomično) zadovoljavanje energetskih potreba čitavog sustava. Ova misao je iskorištena kao polazna točka ovoga istraživanja, gdje je korišten energetski pristup procjeni životnog ciklusa razmatranih sustava. Energetska analiza, putem pokazatelja ukupne potražnje za energijom, prihvaćeni je pristup za procjenu održivosti različitih proizvoda i sustava. U ovome je radu, praćenjem svih materijalnih i energetskih tokova te njihovim svođenjem na primarnu energiju, putem pokazatelja ukupne potražnje za energijom, definiran indeks povrata primarne energije (PERI indeks). Dobivene vrijednosti indeksa PERI pokazuju da sustav gospodarenja komunalnim otpadom kroz kombiniranu materijalnu i energetsku oporabu može vratiti u gospodarstvo do 50% resursa koji su ušli u sustav gospodarenja otpadom u obliku otpadnih materijala. Energetski vektori proizvedeni putem energetske oporabe otpada mogu se iskoristiti za zadovoljavanje energetskih potreba samog analiziranog sustava uspostavom povratne petlje kroz energetske sustave. Na ovaj način, smanjuje se utjelovljena energija sekundarnih materijalnih proizvoda što ima direktan utjecaj na njihovu održivost, kao i održivost cjelokupnog sustava. Rezultati pokazuju da se korištenjem materijalnih sirovina, separiranih iz komunalnog otpada, u proizvodnji smanjuje utjelovljena energija proizvedenih (sekundarnih) materijala za prosječno 63% do 74%, u usporedbi s proizvodnjom primarnih materijala, dok korištenje energije iz otpada, u istim scenarijima, dovodi do dodatnog smanjenja utjelovljene energije i to za 19% do 67%. Navedeni rezultati pokazuju da energija iz otpada može dodatno povećati održivost integriranog sustava gospodarenja komunalnim otpadom kao i proizvedenih materijala unatoč tome što se, kroz novi legislativni okvir Europske unije,

naglasak stavlja na materijalnu oporabu. Također, može se zaključiti da čak i relativno mala količina energije iz otpada, proizvedene u sustavu koji kombinira materijalnu i energetsku oporabu, može pomoći u „zatvaranju petlje“, unutar gospodarstva Europske unije, povećanjem održivosti recikliranja otpadnih materijala. Sa stajališta lokalnih kreatora politika, ekonomska strana problema gospodarenja otpadom još uvijek predstavlja najznačajniji aspekt. Ovaj aspekt je naglašen činjenicom da troškove ovakvih sustava plaćaju njegovi korisnici (građani) čime ovo pitanje veže za sebe i pitanje socijalne prihvatljivosti. Stoga, posljednji analizirani pokazatelj u ovome istraživanju je pokazatelj ukupnog troška analiziranog sustava, izražen po masi odloženog miješanog komunalnog otpada, kojega plaćaju korisnici ovoga sustava. Rezultati ovoga pokazatelja govore da se ukupno najbolji socioekonomski rezultati ostvaruju kombiniranjem materijalne i energetske oporabe. Korištenjem upravo ovih triju parametara, koji obuhvaćaju više važnih područja koje je potrebno sagledati prilikom analize ovakvih sustava, smanjuje se broj kriterija koje je potrebno razmotriti prilikom multikriterijskog rangiranja rezultata. Sveukupni rezultati pokazuju da energetska oporaba otpada na jednoj razini omogućuje povećanje povrata primarne energije te time smanjuje utjecaj na okoliš, kao i ovisnosti o uvozu sirovina. Na drugoj razini pomaže u „zatvaranju petlje“ u kružnom gospodarstvu te promovira simbiozu među industrijskim granama, čime se direktno povećava održivost materijalne oporabe i proizašlih proizvoda. Na trećoj razini omogućava ekonomsku i socijalnu održivost implementacije promjena u sustavima gospodarenja otpadom i njegove oporabe, čime doprinosi širem europskom stremljenju prema transformaciji postojećeg gospodarstva u okviru koncepta kružnog gospodarstva i „zatvaranja petlje“.

PROŠIRENI SAŽETAK

Europsko gospodarstvo ovisi o uvoznim sirovinama te se između 20 i 30% svih sirovinskih potreba Europske unije pokriva putem uvoza. U uvozu značajni udio imaju energenti te industrijski i tehnološki važne sirovine. Uvozom se pokriva 42% potreba za prirodnim plinom, 56% za ugljenom te 88% za naftom, ali i oko 50% potreba za bakrom, 85% za boksitom, 89% za željezom te 100% potreba za širokim spektrom rijetkih zemnih elemenata. Europska unija identificirala je ovaj problem te njegov utjecaj na održivost ekonomskog razvoja, koji je iniciran sirovinskim siromaštvom Europe te stoga proizašlom ovisnosti o uvozu. Načini na koje se ovome problemu nastoji doskočiti su podijeljeni u dva glavna pristupa koja nastoje probleme energetske ovisnosti i materijalne ovisnosti o uvozu riješiti neovisno jedno o drugome.

Dodirno područje koje je identificirano u oba pristupa je područje gospodarenja otpadom. Gospodarenje otpadom predstavlja jedan od vodećih problema s kojima se suočava Europska unija. Zemlje članice EU28 generiraju preko 1800 kg otpada po stanovniku (isključujući mineralni otpad) od čega 27% čini komunalni otpad. Ova količina otpada omogućuje, kroz njegovu materijalnu i energetsku oporabu, zadovoljavanje dijela materijalnih, ali i energetskih potreba starog kontinenta. Prethodno identificirana podjela pristupa rješavanju problema, na materijalni i energetski pristup, identificirana je i u području gospodarenja otpadom i njegove oporabe. Stoga, iako gospodarenje otpadom spaja ova dva pristupa, ova podjela je također izražena u samome konceptu kružnog gospodarstva koji, iako prepoznaje i energetsku oporabu, stavlja naglasak na materijalnu oporabu kojoj daje i prednost. Iz ove kompleksnosti rješavanja problema sirovinske ovisnosti Europe proizašla je i motivacija za ovo istraživanje te je definirano istraživačko pitanje ovoga doktorskog istraživanja: Koja je uloga energetske oporabe otpada u kružnom gospodarstvu i konceptu „zatvaranja petlje“?

Hipoteza

Pregledom literature i regulativa identificiran je širok spektar područja po kojima se treba ocijeniti integrirane sustave gospodarenja komunalnim otpadom te njegove materijalne i energetske oporabe, kako bi se dao cjeloviti odgovor na postavljeno istraživačko pitanje. Zbog velikog broja ciljeva koje se nastoji zadovoljiti, bilo je potrebno provesti multikriterijsku

analizu koja uzima u obzir sve značajne parametre koji opisuju zadovoljavanje predmetnih ciljeva.

Na temelju ovakvog koncepta istraživanja, postavljena je hipoteza da se multikriterijskom analizom može ocijeniti opravdanost uključivanja otpada, kao lokalno dostupnog energenta, u lokalni energetski sustav u vremenu legislativnih promjena po pitanju zbrinjavanja otpada.

Metodologija i rezultati

Zbog kompleksnosti donošenja odluke koja uključuje veliki broj parametara kako bi se uzeli u obzir svi zadani ciljevi, napravljene su analize i izvedeni rezultirajući jednovrijednosni indeksi koji obuhvaćaju veći broj pitanja koja su, kroz legislativni okvir, strategije te prethodne radove, identificirana kao važna. Stoga, navedeni indeksi omogućavaju rangiranje po većem boju ciljeva, čime se smanjuje broj pojedinačnih kriterija koje je potrebno sagledati.

Prvi takav indeks definiran je putem povrata primarne energije. Proizvodnja sekundarnih proizvoda (materijala i energenata) može se vrednovati kroz izbjegnutu proizvodnju primarnih proizvoda dok se usporedba proizvodnje različitih proizvoda (materijalnih proizvoda te energetskih vektora koji nastaju kao produkti tehnologija za materijalnu i energetsku oporabu otpada) može ostvariti kroz svođenje identificirane izbjegnute proizvodnje na ekvivalente primarne energije. Na vrijednost ekvivalenta primarne energije se mogu svesti i svi ulazni tokovi razmatranih tehnologija u sustavu. Korištenjem indikatora ukupne potražnje za energijom (CED) svaki ulazni i izlazni tok pojedine tehnologije svodi se na vrijednost ukupnog energetskog konzuma razmatranog toka, uzimajući u obzir sve potrošnje od „kolijevke“, tj. od ekstrakcije primarnih sirovina iz okoliša preko njihove prerade, transporta, transformacije te proizvodnje razmatranog oblika proizvoda. Pomoću dobivenih ekvivalenata primarne energije, predmetnih ulaza i izlaza po pojedinim tehnologijama, moguće je izračunani faktor povrata primarne energije (PER) koji predstavlja jedan od načina procjene životnog ciklusa proizvoda ili sustava. U prethodnim publikacijama daje se prednost ovakvom pristupu procjeni životnog ciklusa, kod analiziranja sustava gospodarenja komunalnim otpadom, ispred provođenja cjelokupne procjene životnog ciklusa (LCA) i to zbog jednostavnosti i bolje razumljivosti dobivenih rezultata od strane širih skupina ljudi kao i od strane donositelja odluka. Osim toga, faktorom povrata primarne energije može se opisati kretanje cijelog niza jednovrijednosnih LCA parametara (s kojima korelira), čime se istovremeno prikazuje i opterećenje na okoliš kroz

iskorištavanje prirodnih resursa, antropogeni utjecaj na klimu, utjecaj emisija širokog spektra polutanata u zrak, vode (podzemne i površinske) i tlo, kao i utjecaj na ljudsko zdravlje te kvalitetu eko-sustava.

Na temelju ovako robusnog pristupa dizajniran je PERI indeks koji analizira povrat primarne energije kroz kontekst unesene energije u sustav u obliku otpadnih materijala te iskazuje udio povrata primarne energije iz otpadnih materijala, natrag u gospodarstvo. Indeks PERI predstavlja udio energije sadržane u skupljenom otpadu (otpadu koji je ušao u razmatrani sustav) koja se ponovno vrati u gospodarstvo putem materijalne i energetske oporabe te predstavlja razumljiviji pokazatelj od indikatora povrata primarne energije. Indikator povrata primarne energije pokazuje povećanje povrata primarne energije s povećanjem primarne separacije otpada te daje rangiranje scenarija po analiziranim razdobljima, dok novodefinirani indeks PERI pokazuje i neke druge trendove. Iako indeks PERI (za sve scenarije) raste tijekom godina, u prvom se razdoblju može uočiti brži porast, koji je još izraženiji kod scenarija bez integriranog sekundarnog odvajanja otpada. Ovo povećanje je rezultat primarne separacije otpada i nije nastalo kao rezultat samih analiziranih promjena u sustavu gospodarenja otpadom. U kasnijim godinama može se uočiti konvergencija rezultata te manje promjene njegovog iznosa s povećanjem primarnog odvajanja, posebno za scenarije koji su pokazali veći potencijal povrata primarne energije. Ovo ponašanje indeksa PERI definira maksimalnu vrijednost, nakon koje daljnje ulaganje u primarnu separaciju otpada nije više isplativo te je potrebno uvesti konkretnije promjene u sustavu kako bi se povećala održivost sustava – poput uvođenja novih tehnologija. Sveukupni rezultati analize indeksom PERI pokazuju da sustav gospodarenja komunalnim otpadom, kroz kombiniranu materijalnu i energetsku oporabu otpada, može vratiti u gospodarstvo do 50% resursa koji su ušli u sustav gospodarenja otpadom u obliku otpadnih materijala (izraženo u obliku primarne energije), što predstavlja veliki dio prethodno odbačenih sirovina čija se gospodarska vrijednost na ovaj način, u nekom obliku, zadržava unutar gospodarstva.

Prethodno opisana analiza predstavlja vrlo dobar i brz alat za ocjenu zadovoljavanja širokog spektra ciljeva u području utjecaja na okoliš te smanjenja ovisnosti o uvozu, međutim ne govori ništa o „zatvaranju petlje“, utjecaju na kružno gospodarstvo EU, stupnju ponovne uporabe proizvedenih sekundarnih materijalnih i energetskih sirovina kao i stupnju industrijske simbioze što je također jedan od naglašenih ciljeva europske legislative u ovome području.

Integrirani sustav gospodarenja otpadom može istodobno, ne samo težiti "zatvaranju petlje" korištenjem sekundarnih materijalnih sirovina, nego i iskoristiti energiju oporabljenu iz otpada za pogon predmetnog sustava gospodarenja otpadom. Za provođenje ove analize potrebno je izračunati, zasebno, proizvodnju i potrošnju pojedinih postrojenja po energetskim vektorima. Na osnovi dobivenih rezultata dobiveni su udjeli zadovoljavanja energetskih potreba lanca gospodarenja komunalnim otpadom i njegove oporabe, po pojedinim energetskim vektorima, putem energije iz otpada. Zadovoljavanje potreba za pojedinim energetskim vektorima lanca za gospodarenje otpadom i njegove oporabe ima utjecaj na održivost proizvedenih materijala te predstavlja korak dalje u povećanju održivosti proizvedenih materijala, gdje je prvi korak napravljen kroz uporabu sekundarnih sirovina, proizašlih iz otpada, u proizvodnji, čime se skraćuje proizvodni ciklus. Korištenje proizvedene energije iz otpada, putem povratne petlje uspostavljene kroz energetske sustave, za pogon sustava gospodarenja otpadom i njegove oporabe, ima direktan utjecaj na održivost sustava te time i proizvedenih sekundarnih materijala, što se očituje u smanjenju utjelovljene energije materijalnih proizvoda sustava. Na osnovi ovakvog pristupa dobiva se pokazatelj smanjenja utjelovljene energije proizvedenih sekundarnih materijala.

Sveukupni rezultati po godinama i scenarijima pokazuju da se korištenjem separiranih otpadnih materijala iz komunalnog otpada u proizvodnji smanjuje utjelovljena energija proizvedenih (sekundarnih) materijala za prosječno 63% do 74%, u usporedbi s proizvodnjom primarnih materijala. Ta smanjenja potvrđuju tezu da materijalna oporaba otpada i otpadnih materijala doprinosi povećanju održivosti proizvedenih sekundarnih materijala. Međutim, integracija energije oporabljene iz otpada, u istim scenarijima, dovodi do dodatnog smanjenja utjelovljene energije i to za 19% do 67%, ovisno o scenariju i vremenskom okviru koji se razmatra. Navedeni rezultati, uspoređujući smanjenje utjelovljene energije usred oporabe materijala i ukupnog mogućeg smanjenja koje se može postići kombiniranjem materijalne i energetske oporabe otpada, pokazuju da oporabljena energija iz otpada može dodatno povećati održivost integriranog sustava gospodarenja komunalnim otpadom kao i proizvedenih materijala. Ovaj zaključak vrijedi unatoč tome što se, kroz novi legislativni okvir Europske unije, naglasak stavlja na materijalnu oporabu. Koristeći ovaj pristup, analizira se cjelovita slika integriranog sustava gospodarenja komunalnim otpadom te se može zaključiti da čak i relativno mala količina energije proizvedene putem energetske oporabe otpada, u sustavu koji kombinira

materijalnu i energetsku oporabu, može pomoći u „zatvaranju petlje“ unutar gospodarstva EU povećanjem održivosti recikliranja otpadnih materijala.

Iako EU nastoji potaknuti članice na prelazak prema održivijim sustavima gospodarenja otpadom, ekonomska strana problema gospodarenja otpadom još uvijek predstavlja najznačajniji aspekt sa stajališta lokalne razine, pogotovo jer uz sebe veže i pitanje socijalne prihvatljivosti koje je najznačajnije za donosioce odluka (kreatore politika), koji su izabrani od strane građana (korisnika i financijera razmatranog sustava). Kreatori politika moraju procijeniti sve spomenute faktore prilikom donošenja odluka u kojem će smjeru krenuti, ili nastaviti, s razvojem sustava gospodarenja i oporabe komunalnog otpada. Stoga posljednji analizirani pokazatelj u ovome istraživanju predstavlja pokazatelj ukupnog troška analiziranog sustava, izražen po masi odloženog miješanog komunalnog otpada, kojega plaćaju korisnici ovoga sustava.

Na bazi dobivenih ekonomskih rezultata, može se zaključiti da energetska oporaba otpada donosi veći prihod prodajom proizvedenih energenata nego što se može ostvariti prodajom skupljenih sekundarnih sirovina te je ustvari samo bitno kolike troškove (investicijske i operativne) veže za sebe. Tako je vidljivo da termička oporaba otpada rezultira velikim godišnjim troškovima koje je potrebno pokriti kroz povećanje naknade za zbrinjavanje komunalnog otpada, dok anaerobna digestija ima manje troškove koji rezultiraju sveukupno pozitivnom bilancom te smanjenjem predmetnih troškova za građane a time i pozitivnim socijalnim efektom. Osim toga, vidljivo je da se ukupno najbolji rezultati među alternativnim scenarijima ostvaruju kombiniranjem materijalne i energetske oporabe.

Iako se putem definiranja i upotrebe jednovrijednosnih pokazatelja smanjio broj potrebnih pokazatelja za donošenje odluke te se na temelju rezultata prethodnih analiza može zaključiti koji scenariji su pogodniji sa stajališta EU, ali i sa stajališta lokalne razine, analizirani scenariji su dodatno rangirani kroz pristup multikriterijskog donošenja odluka kako bi se olakšalo jednoznačno donošenje odluke. U ovome istraživanju, za donošenje konačne odluke, korištena je PROMETHEE II metoda kao i GAIA pristup prezentiranju dobivenih rezultata.

Rezultati prethodnih (triju) analiza iskorišteni su kao ulazni podaci za provođenje multikriterijskog rangiranja. Povratom primarne energije ocijenjen je ekološki utjecaj kao i utjecaj na smanjenje ukupnog materijalnog i energetskog intenziteta (utjecaj na ovisnost o

uvozu sirovina) scenarija. Smanjenjem utjelovljene energije ocijenjen je utjecaj na europsko (kružno) gospodarstvo i promoviranje simbioze industrija. Socioekonomskom analizom ocijenjen je utjecaj na ekonomsku održivost i socijalnu prihvatljivost analiziranih scenarija. Dobiveni rezultati pokazuju da izbjegavanje energetske oporabe vodi k ukupno lošijim rezultatima – scenarij koji izbjegava energetsku oporabu pokazuje ukupno najlošije rezultate. Analizom rezultata po pojedinim kriterijima vidljivo je da s aspekata ekološkog utjecaja kao i smanjenja sirovinske ovisnosti te utjecaja na europsko (kružno) gospodarstvo i promoviranje industrijske simbioze izbjegavanje energetske oporabe također dovodi do najlošijih rezultata među svim rangiranim scenarijima. Jedino socioekonomska analiza pokazuje bolje rezultate rangiranja ovakvog scenarija razvoja sustava u odnosu na scenarije koji naglašavaju energetsku oporabu tj. iziskuje manje financiranja od strane korisnika sustava.

Zaključci i znanstveni doprinos

Iz legislativnog okvira koji opisuje kružno gospodarstvo, kao i prethodno objavljenih radova, vidljivo je da se naglasak stavlja na smanjenje iskorištavanja materijalnih sirovina tj. na materijalnu oporabu, dok su energetski tokovi većinom zanemareni ili se promatraju samo kroz mogućnost prijelaza na korištenje obnovljivih izvora energije te kroz smanjenje energetske potrošnje putem mjera energetske učinkovitosti. Što se tiče same energetske oporabe otpada, ona se razmatra kao jedna od analiziranih opcija odvojeno od materijalne oporabe. Međutim, to nije slučaj ukoliko bi se promatrao cijeli integrirani sustav gospodarenja otpadom i njegove oporabe, gdje se otpad paralelno može koristiti kao materijalna i energetska sirovina te se ova dva pristupa mogu međusobno nadopunjavati. Rezultati pokazuju da ovakav cjeloviti pogled na problem otpada i njegove oporabe pokazuje najbolje rezultate. Kroz ovo istraživanje identificirana je nova veza između energetske i materijalne oporabe otpada, kroz povratnu petlju koja omogućuje povećanje održivosti proizvedenih (recikliranih) materijala smanjenjem korištenja primarnih izvora energije. Ovo predstavlja novi pogled na ulogu energije iz otpada u sustavima gospodarenja otpadom kao i na vezu između energetske i materijalne oporabe otpada, kroz energetske sustave te proširuje prethodna saznanja o vezi između energetskih sustava i sustava gospodarenja otpadom.

Provedeno istraživanje ne samo da omogućava bolje razumijevanju uloge energije iz otpada kroz kvantificiranje utjecaja „zatvaranja petlje“ na energetskoj strani putem srednjoročne energetske analize alternativnih scenarija nego i dodatno proširuje pogled analize na utjecaj i

ukupnu održivost (ekološku, širu gospodarsku i socioekonomsku) predmetne odluke donesene na bazi ovog novog pristupa. Time se uspostavlja cjeloviti pristup razmatranju cijelog spektra problema koje je potrebno uzeti u obzir prilikom planiranja integriranih sustava gospodarenja otpadom. Dobiveni rezultati naglašavaju važnost integrirane analize otpada i energetskih sustava. Ovime se pokazuje da energija iz otpada ima svoju ulogu u kružnom gospodarstvu.

Pri primjeni višekriterijskog pristupa analizi sustava, potrebno je obratiti pažnju na broj kriterija koji se uzimaju u obzir. Broj tih kriterija može se smanjiti korištenjem kriterija s izraženom međuovisnosti (kolinearnosti) s većim brojem značajnih faktora, čime se pojednostavljuje cijeli proces donošenja odluke. U ovakvome pristupu provođenju predmetne višekriterijske analize također je napravljen iskorak u odnosu na prethodne analize.

Također, analizom dobivenih rezultata i iznesene diskusije može se zaključiti da ovo istraživanje daje odgovor i na ostale pronađene nedostatke kao i manjkavosti u dosadašnjim istraživanjima čime se dodatno potvrđuje znanstveni doprinos.

Na bazi rezultata višekriterijskog rangiranja može se zaključiti da se provedenim pristupom može ocijeniti opravdanost energetske oporabe otpada te korištenja energije iz otpada kao lokalnog energenta u vremenu legislativnih promjena, ne samo po pitanju zbrinjavanja otpada, nego i daljnjeg razvoja europskog gospodarstva. Ovim zaključkom se potvrđuje iznesena hipoteza ovoga istraživanja.

EXTENDED ABSTRACT

The European economy is dependent on import of raw materials. Between 20 and 30% of all raw material needs of the European Union are covered by import. Import plays an important role in the supply of energy carriers and industrially important raw materials. Thus, around 42% of European Unions needs for natural gas, 56% for coal and 88% of oil, 50% for copper, 85% for bauxite, 89% for iron ore and 100% of for a wide range of hi-tech metals are covered by import. The European Union identified these problems and its impact on the sustainability of economic development. The ways in which these problems are being tackled are divided into two main approaches which address the problem of energy import dependence and the problem of material import dependence independently of each other. Waste management is identified as the only common point of these two approaches. Waste management is one of the leading problems the European Union is faced with. EU28 member states generate over 1800 kg of waste per capita (excluding mineral wastes) of which 27% is a municipal solid waste. This amount of waste, through its material and energy recovery, enables the (partial) fulfillment of European material and energy needs. The previously identified division of approaches to identified problems, on the material and energy approach, has also been identified in the area of waste management and waste recovery. Therefore, although waste management combines these two approaches, this division is also present in the very concept of a circular economy, which, while recognizing energy recovery, puts an emphasis on the material recovery of waste and gives it the advantage. From this complexity of solving the problem of European raw material dependence, the motivation for this research arose and the research question of this doctoral research is defined: What is the role of energy recovery of waste in the circular economy and the "closing the loop" concept?

Hypothesis

Through the literature review and a review of corresponding legislation, a wide range of areas are identified in which assessment of the integrated municipal waste management and recovery systems (material and energy) should be performed, in order to obtain a complete response to the research question. Due to the large number of targets which need to be met, a multi-criteria analysis, which takes into account all the relevant parameters that describe the fulfilment of the given goals, is required.

Based on this concept of research, a hypothesis has been made that multi-criteria analysis can justify the inclusion of waste, as a locally available energy source, into a local energy system during the legislative changes in waste management.

Methodology and results

Due to the complexity of decision-making which needs to take into account a large number of parameters, analyses resulting in single-score indexes, which cover a larger number of issues, have been conducted. These indexes enabled ranking by multiple goals and reduced the number of individual criteria which need to be considered.

The first such index is defined by the return of primary energy. Production of secondary (recovered/recycled) products (materials and energy vectors) can be evaluated through the avoided production of primary (virgin) products while the production of different products (material products and energy vectors, produced through technologies for material and energy recovery of waste) can be compared through the primary energy equivalents of identified avoided production,. All input streams, of the considered technologies in the system, can also be reduced to the value of primary energy equivalent. Using the Cumulative Energy Demand (CED) indicator, each input and output stream of a particular technology is reduced to the value of the total energy consumption of the considered flow, taking into account overall energy consumption from “the cradle”, i.e. from the extraction of primary raw materials from the environment, through their processing, transport, transformation and production of the considered product. By using the primary energy equivalents of inputs and outputs per particular technology, it is possible to calculate the primary energy return (PER) factor which represents one of the ways to assess the life cycle of a product or a system. In previous publications, due to its simplicity and better readability of the results, a priority is given to this kind of approach to the life cycle assessment of the municipal waste management system, ahead of the implementation of the full-scale Life Cycle Assessment (LCA). In addition, the primary energy return factor can be used to evaluate a whole set of single score LCA parameters (with which it correlates), thereby, simultaneously showing the environmental burden through the exploitation of natural resources, anthropogenic impact on climate, the influence on the emissions of a broad spectrum emission in the air, water (underground and surface) and soil, as well as the impact on human health and the quality of the ecosystem.

Based on this robust approach, the Primary Energy Return Index (PERI) is designed to analyse the return of primary energy through the context of energy which has entered the analysed system in the form of waste materials. The PERI index represents the share of primary energy, previously contained within the collected waste (waste entering the considered system), that is returned to the economy through material and energy recovery, and represents a more comprehensible indicator then CED primary energy return factor. The primary energy return factor shows an increase in primary energy recovery with the increase in the primary separation of waste and ranks the analysed scenarios (for the analysed periods), while the newly defined PERI index also shows some other trends. While the value of PERI index is increasing over the years (for all scenarios), a faster increase can be observed in the first period, which is even more pronounced in the scenario without integrated secondary separation of waste. This increase is the result of primary waste separation and is not a result of the changes in the waste management system itself. In later years, the convergence of results and smaller changes in the value of PERI index, with the increase of primary separation, can be noticed, especially for scenarios that have shown greater potential for the return of primary energy. This behaviour of the PERI index defines a maximum value, after which further investment in the primary separation of waste is no longer profitable and more concrete changes to the system are needed to increase system sustainability - such as the integration of new technologies. The overall results of the PERI analysis show that the municipal waste management system, through the combined material and energy recovery of waste, can return to the economy up to 50% of the resources that have entered the waste management system in the form of waste materials (expressed as primary energy), which represents a large proportion of previously discarded raw materials whose economic value this way, in some form, remains within the economy.

The above-described analysis is a very good and quick tool for assessing a wide spectrum of environmental impacts and for reduction of import dependence, but it does not say anything about "closing the loop", effects on the EU's circular economy, the re-use of the secondary materials and energy vectors, as well as the degree of industrial symbiosis, which is also one of the accentuated goals of European legislation in this area. An integrated waste management system can at the same time, not only strive to "close the loop" by using secondary raw materials, but also through the use of energy recovered from waste to fuel the analysed system. To carry out this analysis, it is necessary to separately calculate the production and consumption of all technologies in the analysed system, by energy vectors. On the basis of the obtained

results, the energy demand coverage factors, of the municipal waste management system and its recovery chain, through the use of energy from waste, by individual energy vectors, were obtained. Satisfying (part of) the energy demand of the overall waste management system and its recovery chain has an impact on the sustainability of manufactured materials and represents a step further in increasing the sustainability of manufactured materials, where the first step is made through the use of secondary raw materials (derived from waste) in production, thus shortening the production cycle. The use of energy produced from waste, via feedback loops established through the energy systems, for the operation of the waste management system and its recovery chain, has a direct impact on the sustainability of the production system and thus on the sustainability of the produced secondary materials, which is reflected in reduction of embodied energy of the produced materials. Based on this approach, an indicator for the reduction of the embodied energy of the produced secondary materials is obtained.

Overall results, by years and scenarios, show that the use of separated waste materials in the secondary material production reduces the embodied energy of secondary (recycled) materials by an average of 63% to 74%, compared with the production of primary (virgin) materials. These reductions confirm a thesis that material recovery of waste materials contributes to the increase in the sustainability of the produced secondary materials. However, the integrated energy recovery from waste, in the same scenarios, leads to an additional reduction of embodied energy by 19% to 67%, depending on the scenario and considered timeframe. The results of the reduction in the embodied energy due to material recovery and total possible reduction that can be achieved by combining the material and energy recovery of waste showed that recovered energy from waste could further increase the sustainability of the integrated municipal waste management system as well as produced materials. This conclusion is valid despite the fact that the EU's new legislative framework puts an emphasis on material recovery (recycling). Using this approach, a complete picture of an integrated municipal waste management system is analysed, and it can be concluded that even a relatively small amount of energy produced through the energy recovery of waste, in a system that combines material and energy recovery, can help to “close the loop” within the EU economy by increasing the sustainability of waste recycling.

Although the EU encourage its member states to move towards more sustainable waste management systems, the economic side of the waste management problem is still the most

significant aspect on the local level, especially as the question of social acceptability is tied to it, which is the most important question for decision-makers (policy makers), which are elected by the citizens (users and financiers of the considered system). Policy makers must evaluate all of these factors when deciding in which way to continue the development of the municipal waste management and recovery system. Therefore, the last analysed indicator in this study is an indicator of the total cost of the analysed system, expressed by the amount which needs to be paid by the system users per tonne of mixed municipal waste.

On the basis of the obtained economic results, it can be concluded that energy recovery yields higher revenue through the energy sale than it can be achieved through the sale of secondary raw materials, therefore, the deciding factors are the investment and operation costs. It is apparent that the thermal treatment of waste results in large annual costs that need to be covered by the increase of the municipal waste disposal fee, whereas anaerobic digestion has lower costs resulting in a total positive balance and in a reduction of the costs for the citizens and, therefore, a positive social effect. Best results among alternative scenarios are achieved by combining material and energy recovery.

Although the number of indicators needed for decision making has been reduced by defining and use of single-score indicators and, based on the results of previous analyses it can be concluded which scenarios are more appropriate from, not only the EU standpoint but also from the local point of view, the analysed scenarios are further ranked through a multi-criteria decision-making approach to facilitate unanimous decision-making. In this research, for the final decision-making, the PROMETHEE II method was used, as well as the GAIA approach to presenting the obtained results.

The results of the previous analyses were used as inputs for the multi-criteria decision-making – by means of the return of primary energy, the ecological impact as well as the reduction of the total material and energy intensity (impacts on dependence on imports of raw materials) of scenarios, were assessed; by means of the reduction in the embodied energy, impact on the European (circular) economy and promotion of industrial symbiosis was assessed; and by socio-economic analysis, the impact on economic viability and social acceptability of the analysed scenarios was assessed.

The results show that avoiding energy recovery leads to overall worse results - the scenario that avoids energy recovery shows the worst results. By analysing results by individual criteria, it is apparent that from the aspect of ecological impact and reduction of raw material dependence, as well from the aspect of the impact on the European (circular) economy and the promotion of industrial symbiosis, avoidance of energy recovery also leads to the worst results among all ranked alternative scenarios. Only the socio-economic analysis shows better results of the ranking of such a scenario compared to scenarios that emphasize energy recovery, i.e. requires less funding from system users.

Conclusions and scientific contribution

From the legislative framework that describes the circular economy, as well as the previously published papers, it is evident that the emphasis is put on reducing the exploitation of material resources, i.e. on material recovery, while energy flows are mostly neglected or observed only through the transition to renewable energy sources or through the reduction of energy consumption via energy efficiency measures. As far as energy recovery for itself is concerned, it is considered as one of the analysed options separately from material recovery. However, this is not the case when the entire integrated waste management and recovery system is looked upon, where waste can be used in parallel as material and energy resource and where these two approaches can complement each other. The results show that such a holistic view on the problem of waste, and its recovery, show the best results. Through this research, a new link between energy and material recovery of waste has been identified through a feedback loop that enables the increase of sustainability of recycled materials by reducing the use of primary (virgin) energy sources. This enables a new point of view at the role on energy from waste in waste management systems as well as at the link between energy and material recovery of waste through energy systems and broadens previous knowledge of the link between energy systems and waste management systems.

The conducted research, not only helps in better understanding of the role of energy from waste through quantifying the impact of “closing the loop” on the energy side through mid-term energy analysis of alternative scenarios, but also extends the views of the impact analysis on overall sustainability (ecological, wider economic and socio-economic) of the decision made on the basis of this approach. By that, holistic approach for consideration of the whole spectrum of problems which has to be considered when planning integrated waste management systems

is established. Obtained results emphasize the importance of integrated waste and energy systems analysis. This clearly shows that energy from waste has its role in the circular economy.

When applying a multi-criteria approach to system analysis, attention should be paid to the number of criteria which will be taken into consideration. The number of these criteria can be reduced by using criteria with a high degree of interdependence (collinearity) with a number of other significant factors, thus simplifying the entire decision-making process. By this approach to the implementation of the multi-criteria analysis, one more step forward is made compared to the previous analyses.

Also, by analysing the obtained results and the presented discussion, it can be concluded that this research also gives answers to others identified deficiencies in the previous research, which further confirms the scientific contribution.

Based on the results of multi-criteria ranking, it can be concluded that the implemented approach can justify the use of energy recovery of waste and the use of energy from waste as a local energy source in the time of legislative changes, not only in the field of waste management but also in the field of further development of the European economy. This conclusion confirms the hypothesis of this research.

KLJUČNE RIJEČI

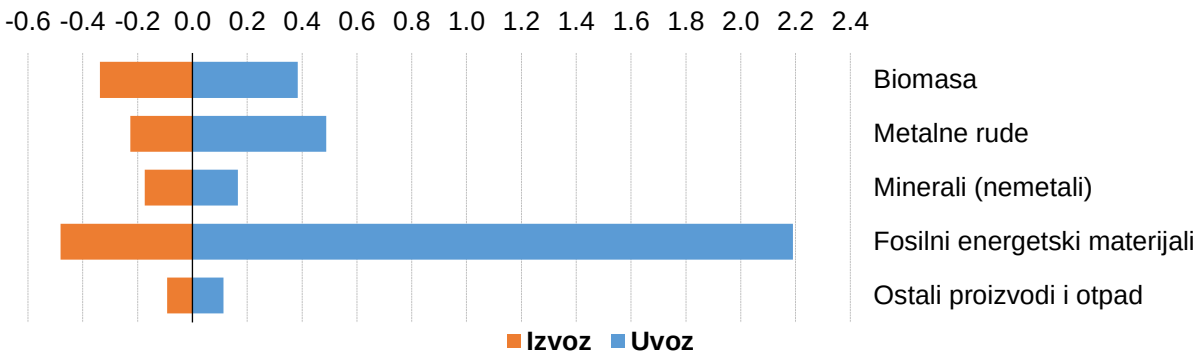
gospodarenje komunalnim otpadom; energetska oporaba otpada; praćenje materijalnih i energetskih tokova; legislativa o gospodarenju otpadom; socioekonomska analiza; analiza održivosti; energetska analiza; kružno gospodarstvo; integracija sustava; višekriterijsko odlučivanje; uloga energije iz otpada

KEY WORDS

municipal solid waste management; energy recovery of waste; energy and material flow tracking; waste management legislation; socio-economic analysis; sustainability analysis; energy analysis; circular economy; system integration; multicriterial decision making; role of energy-from-waste

1. UVOD

Tijekom proteklog stoljeća Europa je razvila ekonomiju sposobnu za generiranje ogromnog boljitka za svoje stanovništvo. Samo od 1995. godine zemlje Europske unije zabilježile su rast industrijske proizvodnje od 31% [1]. Ovakav rast za sobom donosi povećanje potreba za primarnim sirovinama. S vremenom, europske potrebe za sirovinama su prerasle vlastitu proizvodnju industrijskih sirovina iz prirodnih nalazišta. Kako bi izbjeglo stagnaciju, europsko se gospodarstvo u ovim okolnostima okrenulo uvozu te se počelo oslanjati na uvozne proizvodne sirovine i energente. Danas Europa ovisi o uvoznim sirovinama te se između 20 i 30% svih sirovinskih potreba Europske unije pokriva putem uvoza. U uvozu značajnu ulogu imaju energenti te industrijski i tehnološki važne sirovine. Tako se 42% potreba za prirodnim plinom pokriva uvozom, 56% za ugljenom te 88% za naftom, ali i oko 50% potreba za bakrom, 85% za boksitom, 89% za željezom te 100 % za širokim spektrom rijetkih zemnih elemenata [2]. Ovo je, između ostalog, rezultiralo pozicioniranjem EU-a kao drugog najvećeg svjetskog uvoznika s vrijednosti uvoza na razini 1.711 milijardi eura u 2016. godini [3] te uvozom višestruko većim od izvoza – Slika 1. Prekomjerna ovisnost o uvozu primarnih sirovina dovodi u pitanje sigurnost opskrbe te time postaje značajno, ne samo gospodarsko, nego i političko te sigurnosno pitanje.



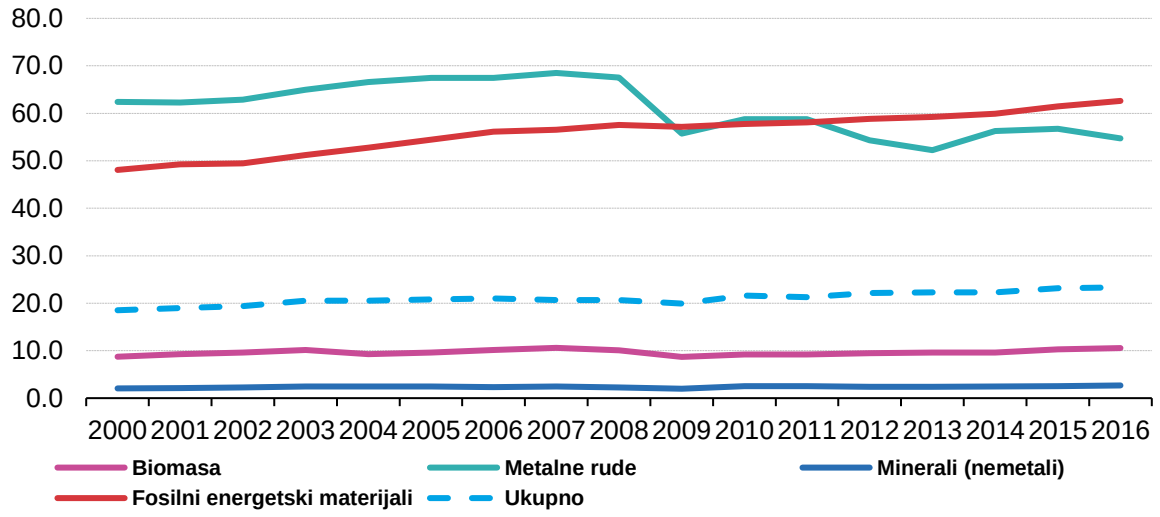
Slika 1. Uvoz i izvoz prema kategoriji materijala, EU-28, 2016 (tona po stanovniku) [4]

1.1. Problem materijalne ovisnosti

Poteškoće u opskrbi sirovinama negativno utječu na industrijsku proizvodnju i ukupni gospodarski razvoj Europe. Kako bi se osigurao daljnji industrijski razvoj, potrebno je industriji

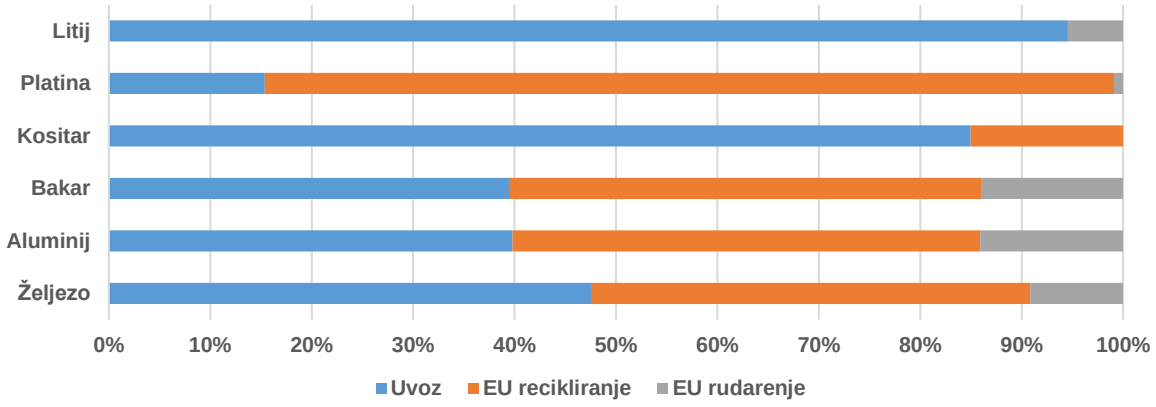
omogućiti pristup ulaznim sirovinama na vrijeme te po razumnoj tržišnoj cijeni. Značajno povećanje cijena sirovina koje nisu europskog porijekla zabrinjava proizvođače, ali i političare, budući da proizvode proizvedene u Europi čini manje konkurentnim u odnosu na proizvodnju u zemljama u tranziciji. Na primjer, cijene rijetkih zemnih elemenata - disprosija i neodimija višestruko su porasle u samo jednoj godini, odnosno s 229 $/kg u 2010. na 1454 $/kg u 2011. godini za disprosij te s 48 $/kg u 2010. na 233 $/kg u 2011. godini za neodimij [5].

Sveukupne potrebe europske industrije za primarnom platinom, kobaltom, rijetkim zemljinim elementima te prirodnom gumom snabdijevaju se uvozom iz zemalja izvan EU. Pa tako Europska komisija periodički objavljuje Listu kritičnih sirovina (*engl. Critical Raw Materials*) [6]. Primarna svrha ovoga popisa je identificirati sirovine s visokim rizikom po pitanju opskrbe i visokom ekonomskom važnosti čija neometana opskrba je od iznimne važnosti za europsku industriju i vrijednosne lance. Ova lista, od rujna 2017. godine, sadrži 27 sirovina: antimon, berilij, borate, kobalt, ugljen za kuhanje, fluorit, galij, germanit, indij, magnezij, prirodni grafit, niobij, fosfatni kamen, silicijski metal, volfram, platinske skupine metala, lagane rijetke zemljane elemente i teške rijetke zemljine elemente, barit, bizmut, hafnij, helij, prirodnu gumu, fosfor, skandij, tantal i vanadij. Osim materijala čija dobava ovisi isključivo o uvozu, postoji još cijeli niz materijala čija je dobava djelomično pokrivena uvozom što se može vidjeti iz Slika 2. Što se tiče drva i papira, industrija EU je uglavnom samodostatna, međutim, raste potražnja za tim materijalima iz drugih industrija, uključujući bioenergiju te postoji kontinuirana potreba za uvozom i tih sirovina [5].



Slika 2. Ovisnost o uvozu prema glavnoj kategoriji materijala, EU-28, 2000 - 2016 (% uvoza EU-a u ukupnim materijalima dostupnim gospodarstvu EU-28) [7]

Metali predstavljaju jedan od najvećih ulaza visokotehnološke industrije, pogotovo s cjenovne strane te su također jedan od glavnih čimbenika ovisnosti o uvozu. Ako se pogledaju metali poput željeza, aluminija i bakra koji spadaju u najrelevantnije rude u smislu trgovanih količina te kositar, platina i litij koji su vrlo relevantni za visokotehnološku proizvodnju, može se uočiti da su količine materijala koje se zadovoljavaju kroz primarnu proizvodnju (rudarenje) unutar EU vrlo niske što govori o izrazitom materijalnom siromaštvu Europe – Slika 3. Također se može uočiti da najveću ulogu u smanjenju visoke ovisnosti o uvozu ima sekundarna proizvodnja (recikliranje).



Slika 3. EU-28 prerađivačka industrija - izvor odabranih sirovina u 2014 (udio prema načinu dobave) [8]

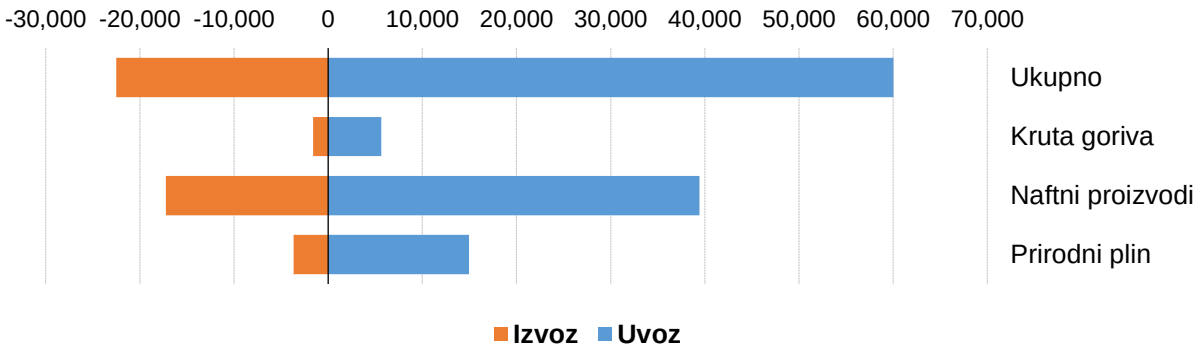
Prikazane vrijednosti predstavljaju uvoz materijala bilo u obliku rude, bilo u obliku poluproizvoda. Južna Amerika predstavlja jednog od najvažnijih dobavljača željeza i bakra dok u zadnje vrijeme pojačava svoju važnost kao najveći dobavljač litija za EU, što postaje sve relevantnije s većom potražnjom za baterijskim sustavima te električnim vozilima. Ovisnost o uvozu rudnih sirovina iz Južne Amerike predstavlja problem zbog nestabilnosti regije poput lokalnih sukoba te socioekonomskih problema, ali i puknuća brana i nedostatka vode što predstavlja izazove za lokalnu rudarsku industriju. U Africi, Gvineja izvozi veći dio svog boksita Europi i time je glavni dobavljač boksita za EU. Za ostale metale, druge regije također imaju važnu ulogu u snabdijevanju uvoznih potreba EU, npr. Južna Afrika (platina) i Indonezija (kositar). Niti ovi dobavni putevi nisu bez rizika, tako postoji problem nasilnih socijalnih konflikata (Južna Afrika), degradacija podmorskog ekosustava zbog podmorskog rudarenja (Indonezija) i ne postojanje veze s lokalnim socioekonomskim razvojem (vezano za vađenje boksita u Gvineji). Pored navedenih, za opskrbu EU rudama i poluproizvodima značajne su i

druge zemlje, npr. Filipini (nikal), SAD (cink, molibden), Australija (cink, titan), Bolivija (cink), Turska (magnezij) i Demokratska Republika Kongo (kobalt, tantal, kositar, zlato), Gabon (mangan), Kanada (titan), Indija (titan), Norveška (titan), Kina (rijetki zemljini elementi), zemlje jugoistočne Azije (prirodna guma) [5], [8].

1.2. Problem energetske ovisnosti

Uz metale, EU je najviše ovisna o uvozu fosilnih energenata (Slika 2) pogotovo kada se pogleda količina (masa) uvezenih sirovina (Slika 1). U trenutačnoj potrošnji energenata u zemljama EU28 dominiraju fosilna goriva sa 73% (prema podacima o primarnoj unutarnjoj potrošnji za 2016.) od čega 15% otpada na kruta goriva, 35% na naftu i naftne derivate te 23% na prirodni plin [9].

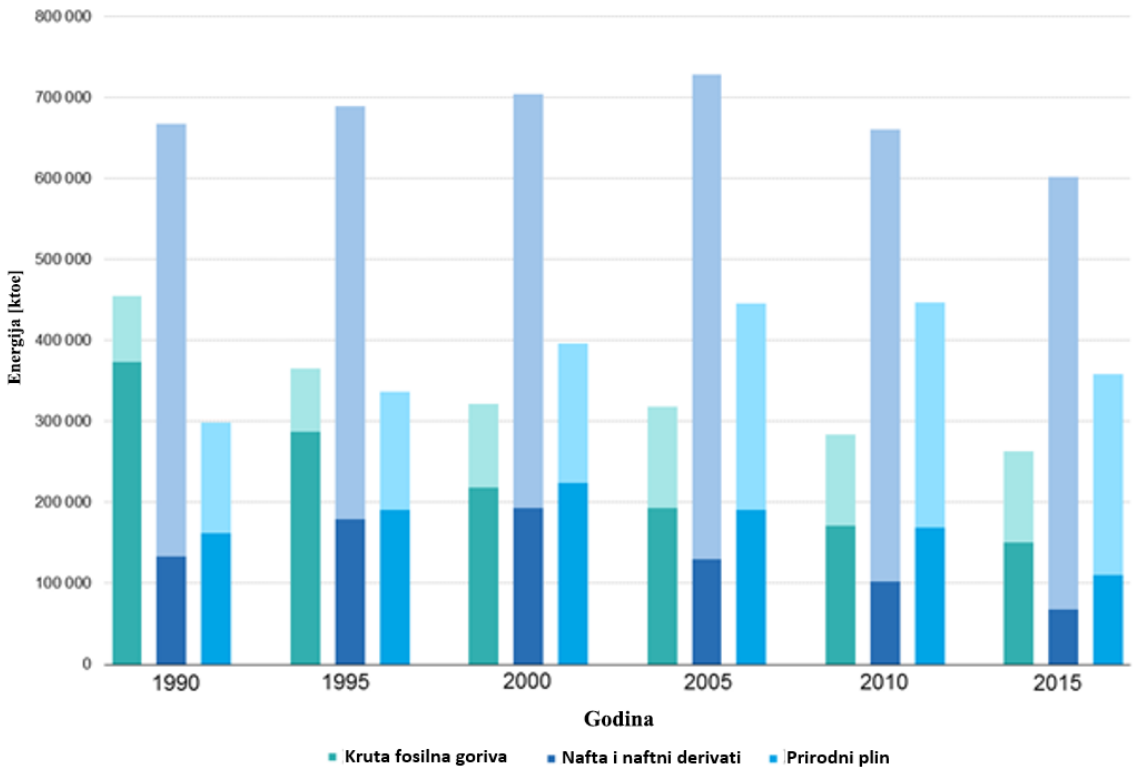
Iako se potražnja za ovim energentima u posljednjih dvadeset godina (od 1997. do 2016.) smanjila s 57.771 PJ na 49.858 PJ, tj. za 14%, primarna proizvodnja ovih energenata u EU se također smanjila s 26.840 PJ na 13.123 PJ, tj. za 51% [9]. Ovo je dovelo do povećanja potreba za uvozom s 48.749 PJ na 60.021 PJ, odnosno porasta za 23% što je dovelo do situacije da uvoz uvelike premašuje izvoz fosilnih energenata – Slika 4.



Slika 4. Uvoz i izvoz prema glavnoj kategoriji fosilnih goriva, EU-28, 2016 (energija u EJ) [9]

Kada se ovi podaci svedu na pojedine energente, dolazi se do podataka da se potražnja za krutim gorivima u posljednjih dvadeset godina smanjila za 31%, dok za naftom i naftnim derivatima za 15%. Za razliku od ostalih prethodno spomenutih goriva, potražnja za prirodnim plinom se u razdoblju od dvadeset godina povećala za 6%. Primarna proizvodnja se za sve spomenute energente smanjila i to 50% za kruta goriva, 57% za naftne proizvode te 47% za prirodni plin što je rezultiralo u povećanju uvoza krutih energenata za 11%, naftnih za 12% dok je uvoz

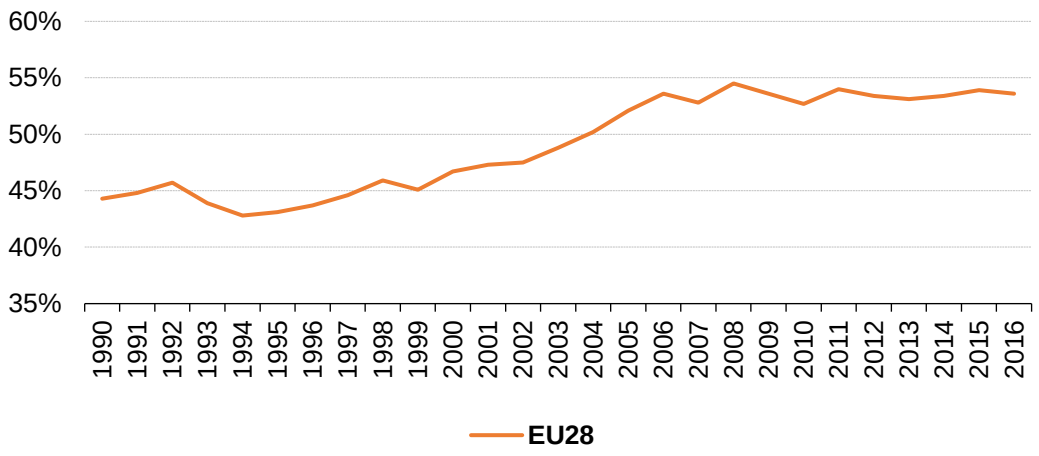
prirodnog plina porastao za čak 76%. Ovi podaci o kretanjima u protekla dva desetljeća pokazuju zabrinjavajući trend porasta energetske ovisnosti što se može vidjeti iz Slika 5, koja pokazuje kretanje odnosa neto uvoza u odnosu na bruto energetsku potrošnju EU (*engl. Gross inland energy consumption*) za sve tri skupine fosilnih energenata.



* Svjetlo obojeni dio predstavlja neto uvoz u odnosu na bruto energetsku potrošnju koja je označena ukupnom visinom stupca

Slika 5. Vremensko kretanje energetske ovisnosti po vrsti goriva, EU-28razdoblje 1990-2015 (energija kao tona ekvivalentne nafte) [10]

Pad u primarnoj proizvodnji kamenog ugljena, lignita, nafte i prirodnog plina u EU-28 doveo je do povećanja uvoza primarne energije. Situacija se stabilizirala nakon financijske i gospodarske krize u 2008. godini te je u 2013. godini trošak uvoza energije iznosio oko 400 milijardi eura [3]. Omjer europske ovisnosti o uvozu energije dosegao je 53,6% (po energiji) u 2016. godini (kruta goriva, naftni proizvodi i prirodni plin zajedno) [11] – Slika 6.



Slika 6. Omjer Europske ovisnosti o uvozu energije, EU-28, razdoblje 1990-2016. (Omjer uvoza i bruto unutarnje potrošnje u %) [11]

Sigurnost opskrbe primarnim energentima dodatno dolazi u pitanje ako većina uvoza dolazi od relativno malo dobavljača. Više od tri četvrtine prirodnog plina uvezenog u EU u 2016. godini je došlo iz samo triju država i to Rusije (40%), Norveške (25%) i Alžira (12%) [12]. Slična situacija je s krutim gorivima (pretežito ugljenom), gdje je gotovo tri četvrtine uvoza krutih goriva poteklo iz Rusije (30%), Kolumbije (23%) i Australije (15%). Uvoz sirove nafte bio je nešto manje koncentriran među glavnim dobavljačima gdje je dvije trećine uvoza raspodijeljeno između pet glavnih dobavljača - Rusije (32%), Norveške (12%), Nigerije (8%), Saudijske Arabije (8%) i Kazahstana (7%) [12].

1.3. Problem zbrinjavanja otpada

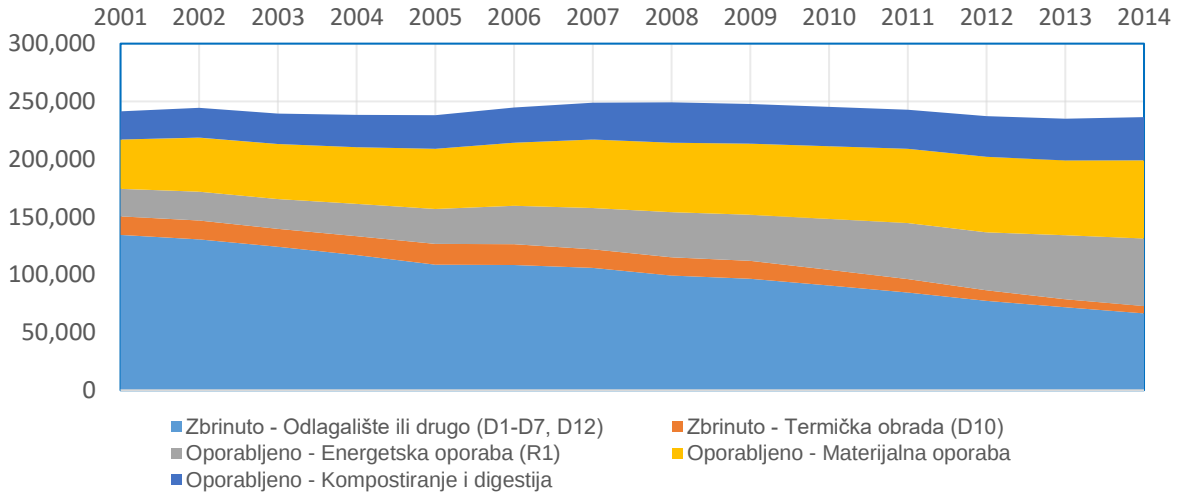
Uz mnoge pozitivne strane, gospodarski razvoj EU, kao takav, nije samo neodrživ sa stajališta zadovoljavanja materijalnih i energetskih ulaza industrijske proizvodnje, nego i sa stajališta izlaza, tj. stvaranja velikih količina otpada koje se ne uklapaju u ustaljene prirodne kružne cikluse materije, a stoga i energije. Unatoč tome što smo svjesni da živimo u pretežito potrošačkom društvu, izostala je briga o zbrinjavanju proizvoda nakon uporabe, što je posebno izraženo u uvjetima „poplave“ jeftinih, ali ne i trajnih proizvoda na tržištu. Posljedice su značajne te je problem krutog otpada prepoznat kao prioritetni problem zaštite okoliša širom svijeta.

Ukupna proizvodnja otpada u EU 2014. godine iznosila je 2.500 milijuna tona, od čega otprilike 1.325 milijuna tona nije bilo ponovno iskorišteno, oporabljeno ili reciklirano te je time

izgubljeno za gospodarstvo EU (otprilike 47% krutog komunalnog otpada bilo je reciklirano ili kompostirano) [13]. Europsko gospodarstvo time gubi znatne količine resursa, tj. potencijalnih sekundarnih sirovina, koji se nalaze u otpadnim tokovima i trenutno većinski biva odbačeno bez oporabe. Ovime EU propušta brojne mogućnosti za značajno poboljšanje učinkovitosti korištenja resursa i uspostavu šireg kružnog gospodarstva. Procjenjuje se da bi se dodatno do 600 milijuna tona odbačenog otpada moglo ponovno iskoristiti ili reciklirati [14].

Zemlje EU28 su u 2014. generirale 4.931 kg otpada po stanovniku. Ako se ne računa mineralni otpad nastao aktivnostima građevinskog i rudarskog sektora te je stoga i inertan, ovaj broj iznosi 1.800 kg po stanovniku, od čega 27% predstavlja kruti komunalni otpad (otpadni materijal iz kućanstava i izvora sličnih kućanstvima) [15], [16].

Zbog veze između gustoće stanovništva i količine generiranog otpada, ovi problemi posebno su naglašeni u urbanim područjima s visokom gustoćom naseljenosti. S oko 75% stanovništva koje se nalazi u gradovima te istim udjelom kojim sudjeluju u generiranju BDP-a zbog koncentracije gospodarskih djelatnosti u područjima gdje je lakše dostupna radna snaga, ali i bolja infrastruktura, Europa se može nazvati "zajednicom gradova" u kojoj se urbanizacijski utjecaji kao i povezani problemi protežu i izvan granica samih gradova, na cijelu EU [17], [18]. Istovremeno, gradovi troše oko 60% do 80% ukupne energije i emitiraju istu količinu stakleničkih plinova na globalnoj razini [19].



Slika 7. Komunalni otpad po tehnologijama gospodarenja (u tonama po godini) [20]

Dok ovako velika količina generiranog otpada predstavlja problem za zemlje države članice EU, istovremeno pruža i priliku za olakšavanje prethodno identificiranih problema - problema

materijalne i energetske nestašice, povećanje diversifikacije energetskih i materijalnih izvora i povećanje sigurnosti dobave kroz smanjenje ovisnosti o uvozu. Dok je jedan od načina za rješavanje problema energetske ovisnosti i uvoza energenata energetska oporaba otpada, problem materijalne ovisnosti se može riješiti kroz materijsku oporabu tj. recikliranje otpadnih materijala. Ovo je već prepoznato od strane država članica EU te se danas putem recikliranja i energetske oporabe otpada kroz spalionice obrađuje otprilike jednak udio krutog komunalnog otpada – Slika 7.

1.4. Rješavanje problema na razini Europske unije

1.4.1. Materijalna strana

Europska komisija je identificirala proizašle probleme u polju materijalne ovisnosti te je 2008. godine pokrenula Inicijativu o mineralnim sirovinama (*engl. Raw Materials Initiative*) [21] s ciljem osiguranja održive dobave neenergetskih, neagrikulturnih sirovina gospodarstvu EU. Ova inicijativa se bazira na tri stupa: osiguranje ravnopravnosti u pristupu resursima u trećim zemljama, poticanje održive opskrbe iz europskih izvora te povećanje materijalne učinkovitosti i udjela recikliranja. Unutar ove inicijative je 2010. godine objavljena prva Lista kritičnih sirovina (*engl. Critical Raw Materials list*) koja je sastavljena na osnovi dvaju čimbenika – ekonomskoj važnosti te rizičnosti dobave sirovina. Lista je u međuvremenu ažurirana 2014. i 2017. godine.

Dok se Inicijativa o mineralnim sirovinama bazira na definiranju politika i strategija, strateški implementacijski plan je pokrenut 2013. godine kroz Europsko inovacijsko partnerstvo o mineralnim sirovinama (*engl. European Innovation Partnership on Raw Materials*) [22]. Ovo partnerstvo okuplja zemlje članice i druge zainteresirane strane s ciljem povećanja udjela industrije mineralnih sirovina u BDP-u na 20% do 2020. godine kroz promoviranje Europe u svjetskog predvodnika u istraživanju te vađenju sirovina kao i njihovoj preradi, recikliranju i zamjeni u proizvodnim procesima. Inicijativa i partnerstvo su također od ključne važnosti za osiguranje financiranja za istraživanja i inovacije u ovome području što je omogućeno kroz Obzor 2020 (*engl. Horizon 2020*), program EU putem kojeg je osigurano 600 milijuna Eura. Kroz osiguranje dobave sirovina ekonomiji EU te osiguravanjem boljitka društvu u cjelini, partnerstvo također igra važnu ulogu u zadovoljavanju ciljeva glavnih inicijativa Europske

komisije: Unija inovacija (*engl. Innovation Union*) [23] i Resursno učinkovita Europa (*engl. Resource efficient Europe*) [24].

Resursno učinkovita Europa jedna je od sedam ključnih inicijativa koje čine strategiju Europa 2020 (*engl. Europe 2020*), ima za cilj pružanje pametnog, održivog i inkluzivnog rasta [25] Europe te predstavlja trenutačno glavnu europsku strategiju za poticanje gospodarskog rasta i stvaranje novih radnih mjesta koju podupiru Europski parlament i Europsko vijeće [26]. Resursno učinkovita Europa ima za cilj stvaranje okvira za transformaciju gospodarstva EU prema sirovinsko efikasnoj i niskougljičnoj ekonomiji. Ovakva transformacija vodi prema povećanju sigurnosti opskrbe resursima, boljim gospodarskim rezultatima, rastu inovacija, povećanju konkurentnosti EU te rezultira podrškom u borbi protiv klimatskih promjena i ograničavanju utjecaja na okoliš povezanih uz iskorištavanje resursa. Povećanje stupnja iskoristivosti sirovina također vodi prema smanjenju troškova te time i cijena proizvoda, kao rezultat smanjenja potrošnje materijala i energenata, što podiže kompetitivnost.

Kako bi se postigla resursno učinkovita Europa, potrebna su tehnološka poboljšanja te značajne promjene u energetskim, industrijskim, poljoprivrednim i transportnim sustavima kao i promjene u ponašanju kako proizvođača, tako i potrošača. Sve navedeno se može postići jedino kroz uspostave sinergija kroz cijeli niz različitih područja. Primjeri takvih sinergija su npr. mjere u području sprječavanja klimatskih promjena i u području energetske efikasnosti koje neposredno utječu na povećavanje energetske sigurnosti i smanjuju utjecaj mogućeg naglog rasta cijena na međunarodnim tržištima energentima te npr. povećanje udjela recikliranja koje utječe na smanjenje pritiska na sustav dobave primarnih sirovina, pomaže oporabiti vrijedne materijale koji bi inače bili odbačeni kao i smanjiti potrošnju energije te emisija stakleničkih plinova u cijelome proizvodnom lancu – od rudarenja primarnih sirovina do proizvodnje i prerade finalnih materijala i proizvoda. Osim pozitivnih sinergijskih utjecaja, treba sagledati i negativne utjecaje. Da bi se na duži rok identificirali takvi utjecaji kao i uzeli u obzir prilikom donošenja odluka, potrebno je uzeti u obzir cijeli životni ciklus korištenih sirovina.

Na ovome putu, koji uključuje mjere za povećanje učinkovitosti korištenja resursa te prekidanje veze između povećanja energetske i materijalne potrošnje te utjecaja na okoliš od gospodarskog rasta, Vodičem za resursno učinkovitu Europu (*engl. Roadmap to a Resource Efficient Europe*) [27] ocrtana je „transformacija unutar jedne generacije - u energetici, industriji, poljoprivredi, ribarstvu i transportu te u ponašanju proizvođača i potrošača" kao dio strategije Europa 2020.

U njemu je kružno gospodarstvo (*engl. Circular Economy*) predloženo kao najbolji koncept po kojem se treba voditi transformacija u svim područjima. Kako ova strategija stavlja naglasak na važnost materijalne oporabe otpada, njezini ciljevi su komplementarni s ciljevima europske legislative po pitanju zbrinjavanja otpada.

1.4.2. Gospodarenje otpadom

Prvi korak prema resursno učinkovitoj Europi napravljen je kroz europsku Direktivu o odlaganju otpada (Direktiva 1999/31/EC) iz 1999. godine, koja postavlja ograničenja po pitanju odlaganja biološke komponente komunalnog otpada. Po tome je količinu biorazgradivog otpada koju se odlaže na komunalnim odlagalištima potrebno smanjiti za 25% do 2010., za 50% do 2013. te za 65% do 2020. godine, u odnosu na količine odložene 1995. godine. Osim toga, u članku 6(a) Direktive o odlaganju otpada, određeno je da je sav otpad namijenjen deponiranju potrebno prvo obraditi (s izuzetkom inertnih materijala) s ciljem povećanja udjela oporabe za većinu frakcija iz komunalnog otpada [28].

Ciljevi Europske unije po pitanju gospodarenja komunalnim otpadom definirani su 2008. godine Okvirnom direktivom o otpadu (Direktiva 2008/98/EC) [29] za period do 2020. godine. Ova direktiva definira osnovne pojmove vezane uz gospodarenje otpadom te njegovu oporabu i recikliranje. Predmetnom direktivom napravljen je korak dalje od načela "onečišćivač plaća" te se uvodi pojam "proširene odgovornosti proizvođača" što obuhvaća oblikovanje proizvoda koje uzima u obzir učinkovitu upotrebu resursa tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda, uključujući njegove popravke, oporabu i recikliranje. Kretanjem u ovom smjeru nastoji se smanjiti proizvodnja otpada te proizvedeni otpad koristiti kao resurs. U ovom kontekstu, Okvirna direktiva o otpadu postavlja osnovna načela gospodarenja otpadom te donosi dva cilja koja je potrebno zadovoljiti do 2020. godine na razini EU, ali i svake države članice posebno: 70% građevinskog otpada te 50% pojedinih otpadnih materijala iz komunalnog otpada treba biti pripremljeno za ponovnu uporabu i recikliranje. Također, uspostavljena hijerarhija gospodarenja otpadom, kao jedan od osnovnih načela gospodarenja otpadom, daje najveću prednost izbjegavanju nastanka otpada (ponovnom korištenju materijala prije nego što se klasificiraju kao otpad) dok se materijalnoj oporabi daje prvenstvo u obradi nastalog otpada. Energetska oporaba otpada je prema ovome načelu pozicionirano nakon materijalne oporabe te je preferencijalni izbor u odnosu na odlaganje.

U novom planu o kružnom gospodarstvu (dokument „Zatvaranje kruga — akcijski plan EU-a za kružno gospodarstvo“ – *engl. „Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy“* [30]) EU stavlja naglasak na pripremu za ponovnu uporabu i recikliranje ključnih tokova otpada te povećanje njihovih udjela. Glavna ideja iza ovoga plana je postupno izjednačavanje razine najbolje prakse po državama članicama te poticanje na potrebna ulaganja u području gospodarenja otpadom. Akcijski plan o kružnom gospodarstvu dio je šireg Paketa kružnog gospodarstva [31] koji uključuje zakonske izmjene vezane za otpad s ciljem poticanja europske tranzicije prema kružnom gospodarstvu. Uspostava kružnog gospodarstva trebala bi potaknuti povećanje konkurentnosti EU na globalnoj sceni, potaknuti održivi gospodarski rast te omogućiti stvaranje novih radnih mjesta.

Kružno gospodarstvo uvodi koncept "zatvaranje petlje" životnog ciklusa materijala i proizvoda te uvodi mjere koje pokrivaju cijeli životni ciklus sirovine/materijala/proizvoda, od ekstrakcije, proizvodnje i korištenja preko odlaganja i gospodarenja otpadom pa do tržišta sekundarnim sirovinama te oporabe. "Zatvaranje petlje" između kraja životnog ciklusa proizvoda i njegove proizvodnje omogućuje cirkulaciju resursa, materijala i proizvoda unutar EU gospodarstva te se time i njegova energetska, materijalna i ekonomska vrijednost zadržava unutar gospodarstva što je dulje moguće. Stavlja se naglasak na izbjegavanje proizvodnje otpada kroz bolji dizajn proizvoda (eko-dizajn) što vodi izdržljivijem proizvodu kojeg je lakše rastaviti, popraviti i, na kraju, reciklirati. Navedene mjere nadopunjuju se s mjerama u području energetske učinkovitosti te se kroz poboljšanje proizvodnih procesa smanjuje proizvodnja otpada i korištenje resursa. Konkretno, u revidirane prijedloge o otpadu uvršteni su i viši ciljevi u pogledu recikliranja ambalaže, što je objašnjeno kao osnaženje ciljeva u pogledu komunalnog i ambalažnog otpada od čega bi korist imali i gospodarstvo i okoliš. Sumarno, glavni ciljevi i mjere koji se tiču recikliranja otpada a posebno ambalažnog otpada navode se u nastavku:

- udio recikliranja komunalnog otpada veći od 65% do 2030. godine
- uz postojeći važeći cilj oporabe i recikliranja komunalnog otpada od 50% do 2020. godine
- udio recikliranja ambalažnog otpada podiže se na 75% do 2030. godine
- cilj smanjenja odlaganja komunalnog otpada na maksimalnih 10% do 2030. godine
- zabrana odlaganja odvojeno sakupljenog otpada
- promicanje ekonomskih instrumenata za obeshrabrivanje odlaganja otpada

- pojednostavljene i poboljšane definicije i usklađene metode izračuna za stope recikliranja u cijeloj EU.

Ova dugogodišnja rasprava o Paketu kružnog gospodarstva, koja traje od srpnja 2014. godine, rezultirala je donošenjem Paketa o otpadu koji je 14. lipnja 2018. objavljen u Službenom listu Europske unije [32]. Ovaj paket donosi izmjene propisa koji se odnose na gospodarenje otpadom te se sastoji od četiri direktive: Direktive (EU) 2018/851 o izmjeni Direktive 2008/98/EZ o otpadu [33], Direktive (EU) 2018/850 o izmjeni Direktive 1999/31/EZ o odlagalištima otpada [34], Direktive (EU) 2018/852 o izmjeni Direktive 94/62/EZ o ambalaži i ambalažnom otpadu [35] te Direktive (EU) 2018/849 o izmjeni Direktiva 2000/53/EZ o otpadnim vozilima, Direktiva 2006/66/EZ o baterijama i akumulatorima i o otpadnim baterijama i akumulatorima te Direktiva 2012/19/EU o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi [36]. Ovaj paket u suštini potvrđuje prethodno navedene ciljeve i mjere koji se tiču recikliranja otpada s manjim izmjenama.

Glavne značajke konačnih akata uključuju izmjenu ciljeva za ponovnu upotrebu i recikliranje komunalnog otpada (60% do 2030. i 65% do 2035.), za odlaganje komunalnog otpada (10% do 2035. godine) te za recikliranje ambalažnog otpada (70% do 2030.). Također, stavlja se naglasak na provedbu hijerarhije gospodarenja otpadom te se širi opseg mjera koje države članice moraju provesti u području prevencije otpada (uključujući i otpad od hrane); uvode se odredbe s ciljem izbjegavanja kontaminacije sekundarnih sirovina; sheme proširene odgovornosti proizvođača postaju obavezne za ambalažu do 2024; te se postrožuju zahtjevi vezani za odvojeno prikupljanje otpada. Isto tako se traži od Europske komisije da provede analizu sustava proširene odgovornosti proizvođača; revidira Direktivu za vozila na kraju životnog ciklusa; razmotri mogućnost implementacije cilja smanjenja generiranja otpada od hrane; razmotri mogućnost implementacije cilja vezanog uz ponovnu uporabu, smanjenje proizvodnje te oporabu i recikliranje specifičnih tokova otpada; razmotri kvantitativne (po stanovniku) ciljeve vezane za odlaganje otpada, ponovnu uporabu ambalaže te recikliranje. Osim očuvanja resursa i zaštite okoliša ovakav pristup pruža i velike potencijale za razvoj gospodarskih aktivnosti kroz razvoj gospodarskih grana zasnovanih na gospodarenju i oporabi različitih vrsta otpada.

1.4.3. Energetska strana

Osim problema materijalne ovisnosti, EU je identificirala problem energetske ovisnosti. Tako je u zelenoj knjizi iz 2001. pod naslovom *Prema Europskoj strategiji sigurnosti opskrbe energijom* (*engl. Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply*) [37] definirano značenje pojma sigurnosti energetske dobave (*engl. energy supply security*) kao „osiguranje, na dobrobit svojih građana i za pravilno funkcioniranje gospodarstva, neometane fizičke dostupnosti energetskih proizvoda na tržištu po pristupačnim cijenama za sve potrošače (privatne i industrijske), poštujući ekološka načela te s pogledom prema održivom razvoju“. Pod tim pojmom sažet je cijeli niz problema s kojima se EU treba suočiti poput porasta potražnje za energentima na globalnoj razini, natjecanje za energetskim resursima iz zemalja u tranziciji, nestabilnost u regijama koje se ubrajaju u najveće proizvođače energenata, geopolitička previranja, ali i sami obvezujući ciljevi u području obnovljivih izvora i energetske učinkovitosti koji su uvedeni kao dio paketa s ciljem rješavanja pitanja klimatskih promjena predstavljaju izazov u ovome području. "Kako bi se suočili s ovim izazovima, energetska sigurnost, učinkovitost, razvoj infrastrukture, dovršetak unutarnjeg tržišta energije i održivost su inherentno povezani" [38]. Stoga su kroz planove EU, energetski ciljevi povezani s ciljevima u području održivog razvoja, pogotovo klimatskih promjena.

EU je prepoznala probleme energetske sigurnosti i klimatskih promjena kao neke od ključnih izazova koji će definirati daljnji razvoj cijelog europskog energetskog sustava. Kako bi se riješila ova pitanja, Europska komisija usvojila je 2020 klimatsko-energetski paket (*engl. 2020 Climate and Energy Package*) [39] (Direktive 2009/29/EC [40], 2009/28/EC [41], 2009/31/EC [42] 406/2009/EC [43] Parlamenta i Vijeća) i 2030 okvir klimatsko-energetske politike (*engl. 2030 Climate and Energy Framework*) [44]. Navedeni 2030 okvir klimatsko-energetske politike temelji se na 2020 klimatsko-energetskom paketu te je u skladu s dugoročnim ciljevima i perspektivom navedenima u Planu puta za prijelaz na konkurentno gospodarstvo s niskim udjelom ugljika do 2050. godine (*engl. Roadmap for Moving to a Low-carbon Economy in 2050*) [45], Energetskom planu do 2050 (*engl. Energy Roadmap 2050*) [46] i Bijeloj knjizi o prijevozu pod nazivom Plan puta za jedinstveno europsko prometno područje - Prema konkurentnom i resursno učinkovitom transportnom sustavu (*engl. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*) [47]. Ovaj put uključuje mjere na svim područjima, kako u gospodarstvu i sektoru kućanstva, tako i u samom energetskom sektoru.

Tako Sustav trgovanja emisijama (*engl. EU Emissions Trading System*) predstavlja ključni alat EU za smanjivanje emisija stakleničkih plinova iz energetskog sektora i industrije, kao i zrakoplovnog sektora, pošto pokriva 45% ukupnih emisija stakleničkih plinova EU. Nacionalni ciljevi za smanjenje emisija stakleničkih plinova pokrivaju ostalih 55% poput kućanstava, poljoprivrede, otpada te transporta (isključujući zrakoplovstvo). Predmetni ciljevi su određeni specifično za svaku zemlju sukladno stupnju gospodarskog razvoja zemlje. Zemlje članice EU su također preuzele obvezujuće nacionalne ciljeve po pitanju povećanja udjela energije iz obnovljivih izvora energije u ukupnoj energetskoj potrošnji te transportu. Ciljevi također variraju od države članice do države članice, kako bi odrazili različitost u polaznim točkama zemalja po pitanju proizvodnje iz obnovljivih izvora energije te njihovu sposobnost daljnjeg povećanja udjela obnovljivih izvora. Dodatno, putem povećanja energetske učinkovitosti u rezidencijalnom i poslovnom sektoru pokušava se smanjiti finalna potrošnja svih energenata.

Kako bi se postiglo smanjenje emisija stakleničkih plinova za 80% ispod razina iz 1990. godine (s ciljevima od 20% do 2020., 40% do 2030., 60% do 2040. i 80% do 2050.), svi sektori trebaju pridonijeti. Pa bi tako elektroenergetski sektor trebao gotovo u potpunosti eliminirati svoje emisije stakleničkih plinova do 2050, grijanje bi se trebalo temeljiti na električnoj energiji proizvedenoj iz obnovljivih izvora energije (poput vjetra, sunca, vode i biomase) ili drugih izvora s niskim emisijama. Emisije iz transporta trebale bi se smanjiti za više od 60% ispod razine 1990. godine do 2050. godine uz korištenje bio-goriva i bioplina te elektrifikacije sektora prometa, dok je u sektoru zgradarstva predviđeno smanjenje emisija za više od 60% kroz zamjenu fosilnih goriva električnom energijom iz obnovljivih izvora za sustave grijanja i hlađenja. U ovome smjeru, u Toplinskom putokazu Europe (*engl. Heat Roadmap Europe*) [48], [49] naglašena je važnost centraliziranih toplinskih sustava (CTS) (*engl. district heating systems*) u ispunjavanju ciljeva EU. U sektoru industrije očekuje se smanjenje emisija stakleničkih plinova za više od 80% kroz korištenje učinkovitijih procesa, mjera energetske učinkovitosti, recikliranja te novih tehnologija. Ispunjenje ovih ciljeva veže za sebe i ispunjenje ciljeva u području povećanja energetske proizvodnje iz obnovljivih izvora energije za 20% do 2020. te 32% do 2030. godine kao i povećanja energetske učinkovitosti na 20% do 2020. te 32,5% do 2030 [50], [51]. Kroz postizanje postojećeg cilja električne interkonekcije od 10% do 2020. te s ciljem postizanja 15% do 2030. godine, pruža se potpora dovršetku unutarnjeg tržišta energije.

U ovome kontekstu, gradovi igraju važnu ulogu jer troše oko 75 posto globalne primarne energije (PE) i emitiraju 50% do 60% ukupnih stakleničkih plinova [52]. Zbog toga je prethodno analiziran razvoj energetskih sustava gradova i urbanih regija [53], kao i upravljanje resursima [54]. S druge strane, gradovi generiraju više od 75% bruto domaćeg proizvoda zemlje (BDP) i stoga zahtijevaju neprekidnu opskrbu energijom [52]. Važnost lokalnih energetskih izvora i njihova upotreba u europskim energetskim sustavima također je naglašena u Toplinskom putokazu Europe [48], [49], gdje su identificirani pozitivni utjecaji lokalnih izvora energije, kao što je otpad, na energetski sustav EU. Osim toga, otpad je klasificiran i kao primarni izvor toplinske energije u centraliziranim toplinskim sustavima.

2. MOTIVACIJA, PITANJA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

2.1. Motivacija i istraživačko pitanje

Motivacija za ovo istraživanje je proizašla iz kompleksnosti pristupa rješavanju problema energetskog i materijalnog siromaštva Europske unije. Kao što se može vidjeti iz uvodnog dijela, inicijative, planovi te zakonski akti vezani za rješavanje materijalnih i energetskih problema, prvenstveno vezanih za održivi razvoj, su međusobno razdvojeni, ali ipak streme prema istome cilju.

Jedan od identificiranih načina za rješavanje ovih problema je oporaba otpada. Tako Inicijativa o mineralnim sirovinama [21], u jednom od svoja tri stupa na kojima se bazira, naglašava važnost recikliranja, dok Europsko inovacijsko partnerstvo o mineralnim sirovinama [22] nastoji promovirati Europu u svjetskog predvodnika u području recikliranja. Isto tako Resursno učinkovita Europa [24] navodi recikliranje kao važan čimbenik u smanjenju pritiska na sustav dobave primarnih sirovina te u smanjenju potrošnje energije i emisija stakleničkih plinova u cijelome proizvodnom lancu. U ovome području se ističe i Vodič za resursno učinkovitu Europu [27] koji nastoji povećati učinkovitost korištenja resursa te prekinuti vezu između povećanja energetske i materijalne potrošnje te utjecaja na okoliš od gospodarskog rasta.

S druge strane, transformacija energetskog sektora bazirana na dekarbonizaciji je zacrtana kroz 2020 klimatsko-energetski paket [39], 2030 okvir klimatsko-energetske politike [44], Plan puta za prijelaz na konkurentno gospodarstvo s niskim udjelom ugljika do 2050. godine [45], Energetski plan do 2050. [46] i Bijelu knjigu o transportu [47], ali i kroz strategiju Klimatski neutralne Europe 2050 (*engl. Climate-neutral Europe by 2050*) [55] koja pokriva gotovo sve politike EU te je u skladu s ciljem Pariškog sporazuma (*engl. Paris Agreement*) [56] da se povećanje globalne temperature održi na razini znatno nižoj od 2°C. U ovome pogledu, ne samo da ciljevi pokrivaju sektor gospodarenja otpadom i njegovog zbrinjavanja, nego se također navode uporabe biootpada i bioplina kao načini smanjenja emisija u transportu te se naglašava važnost zamjene fosilnih goriva. Time otpad i njegova energetska oporaba također nalaze svoje mjesto u razvoju energetskog sektora Europske unije. Ovo je također naglašeno kroz Toplinsku mapu Europe [48], [49] gdje je otpad klasificiran kao primarni izvor topline u centraliziranim toplinskim sustavima.

Dok je jedan od načina za rješavanje problema energetske ovisnosti i uvoza energenata energetska oporaba otpada, problem materijalne ovisnosti se može riješiti kroz materijalnu oporabu otpadnih materijala, što je naglašeno kroz legislativu EU po pitanju gospodarenja otpadom čiji je cilj smanjenje utjecaja sustava gospodarenja otpadom na okoliš i zdravlje ljudi te povećanje učinkovitosti sustava u pogledu oporabe sirovina. U Vodiču za resursno učinkovitu Europu [27] kao dio strategije Europa 2020., kružno gospodarstvo je predloženo kao najbolji koncept po kojem se treba voditi transformacija europskog gospodarstva. Ovaj koncept stavlja naglasak na materijalnu oporabu otpada kroz koncept "zatvaranja petlje" životnog ciklusa materijala i proizvoda - od ekstrakcije, proizvodnje i korištenja preko odlaganja i gospodarenja otpadom pa do tržišta sekundarnim sirovinama te oporabe.

Iako je Europska unija identificirala jedinstven problem održivosti ekonomskog razvoja koji je iniciran njezinim sirovinskim siromaštvom te stoga proizašlom ovisnosti o uvozu, načini na koje se ovome problemu nastoji doskočiti su podijeljeni u dva glavna pristupa koja nastoje probleme energetske ovisnosti i materijalne ovisnosti o uvozu riješiti neovisno jedno o drugome. Jedino dodirno područje koje je identificirano u oba pristupa je područje gospodarenja otpadom gdje se otpad, kroz svoju materijalnu i energetsku oporabu, može iskoristiti za zadovoljavanje dijela materijalnih, ali i energetskih potreba. Iako spaja ova dva pristupa, ova podjela je također izražena u području gospodarenja otpadom gdje koncept kružnog gospodarstva, iako prepoznaje i energetsku oporabu, stavlja naglasak na materijalnu oporabu kojoj daje i prednost. U tom kontekstu je postavljeno istraživačko pitanje ovoga doktorskog istraživanja:

- Koja je uloga energetske oporabe otpada u kružnom gospodarstvu i konceptu „zatvaranja petlje“?

2.2. Ciljevi istraživanja

2.2.1. Pregled područja istraživanja

Paket kružnog gospodarstva stavlja veći naglasak na „zatvaranje petlje“ na materijalnoj strani. Zbog toga, razvijeni model kružnog gospodarstva [57] uzima u obzir, pored ekonomskih parametara, samo emisije u okoliš i utjecaj reciklabilnih sekundarnih sirovina koje ulaze u proizvodni proces. Model zaključuje da gospodarski rast ne može održavati/poboljšati

postojeću kvalitetu okoliša (suprotno Kuznetsovoj krivulji za otpad [58]) i da bi se to učinilo, treba povećati udio recikliranja. Utjecaj materijalne oporabe analizirao se u mnogim radovima. Tako je u [59] analiziran utjecaj „zatvaranja petlje“ u proizvodnji aluminijskih limenki. Ova analiza je pokazala da povećanje količina recikliranog materijala smanjuje utjecaj proizvodnje materijala na okoliš, tj. povećava njegovu ekološku održivost. Ovaj pristup analizi se dodatno proširuje u [60] uspoređujući proizvodnju recikliranih materijala po principu zatvorene petlje iz miješane aluminijske otpadne ambalaže. „Zatvaranje petlje“ u procesu gospodarenja plastičnim otpadom razrađeno je u [61] gdje se analiziraju različiti pristupi njegovoj oporabi: zatvoreni, polu-zatvoreni te recikliranje po otvorenoj petlji kao i termička obrada (spaljivanje) s energetskom oporabom. U [59] je također sagledan samo jedan mali dio energetskog aspekta te je uzeto u obzir korištenje obnovljivih energetskih izvora za pogon samoga proizvodnog procesa. Nastavno, u [62], pojednostavljena LCA analiza je korištena za kvantificiranje energetske potrošnje sustava recikliranja i ponovne uporabe tekstilnog otpada te identificira neto energetsku korist ovog pristupa po kilogramu izbjegnute materijalne proizvodnje.

Energenti proizvedeni iz komunalnog otpada dio su urbanih energetskih sustava – centraliziranih toplinskih sustava, elektroenergetskog sustava, sustava distribucije prirodnog plina i transportnog sustava. Oni zamjenjuju ostale primarne energente što dovodi do djelomičnog prijelaza potrošnje na energiju iz otpada. Zbog međuovisnosti, planiranje sustava gospodarenja komunalnim otpadom se mora provoditi skupa s energetskim i urbanističkim planiranjem. Proizvedeni energenti mogu se koristiti za zadovoljavanje energetskih potreba samog sustava gospodarenja otpadom na lokalnoj (gradskoj) razini ili šire (na razini cijelog sustava), što čini korak dalje u konceptu "zatvaranja petlje" koji je uveden Paketom kružnog gospodarstva. Zbog toga je, prethodno, na razini grada već analiziran razvoj energetskih sustava [63] kao i upravljanje resursima [64]. Isto tako, potencijal energetske oporabe otpada kao i moguća smanjenja emisija stakleničkih plinova kroz različite tehnologije, poput anaerobne digestije, spaljivanja i pirolize, analizirani su u [65]. Šira analiza, bazirana na analizi životnog ciklusa (*engl. Life Circle Assessment - LCA*), provedena je u [66] i [67], međutim uzete su u obzir samo tehnologije za proizvodnju isključivo električne energije. Analize životnog ciklusa sustava gospodarenja otpadom šire regije s naglaskom na prikupljanje i primarno odvajanje otpada te oporabu ostatnog otpada, uključujući i energetsku, dane su u [68] i [69]. Kao što je vidljivo, mnogi radovi pokrivaju potencijalnu proizvodnju energije iz komunalnog otpada, posebno u urbanim područjima, međutim uglavnom se fokusiraju na proizvodnju električne

energije. Izuzeće je [70] gdje se provodi analiza sustava gospodarenja otpadom s pročišćavanjem proizvedenog bioplina za procjenu potencijalne uporabe biometana u transportu na temelju LCA pristupa. Također, promjene u količini i sastavu otpadnih tokova u vremenu nisu obrađene u prethodnim radovima. Pregled potencijala za energetsku oporabu otpada kao i tehnologija dan je u [71], ali ne kao dio integriranih sustava gospodarenja komunalnim otpadom. Ovaj je rad, za razliku od ostalih, uzeo u obzir promjene u količini otpada kao i u proizvedenoj energiji. Tehno-ekonomska analiza koncepta uporabe otpada za proizvodnju biometana u urbanom okruženju dana je u [72]. Ovaj rad sagledava veze i sinergije između sektora gospodarenja otpadom i sektora transporta te daje usporedbu s alternativom ubrizgavanja biometana u plinsku mrežu, međutim interakcija s drugim tehnologijama nije analizirana.

2.2.1.1. Analiza životnog ciklusa

Integrirani sustavi gospodarenja komunalnim otpadom analizirani su u mnogim aspektima. Iako niti jedan aspekt ne smije biti zanemaren, pristup analizama baziran na analizi životnog ciklusa dobio je na važnosti zbog odrednica iz Okvirne direktive o otpadu koja nalaže da potencijalne devijacije od hijerarhije gospodarenja otpadom moraju biti opravdane kroz razmatranja koja uključuju utjecaje na razini cijelog životnog ciklusa. To se često postiže putem LCA analize koja je standardizirana znanstvena metoda za procjenu utjecaja na razini cijelog životnog ciklusa. Osnovni okvir LCA analize donesen je kroz standard Međunarodne organizacije za standardizaciju (*engl. International Standardisation Organisation – ISO*) ISO 14040 i 14044:2066 standarde [73], [74]. Osim toga, Europska komisija je naglasila LCA analizu kao "najbolji okvir za procjenu potencijalnih utjecaja proizvoda na okoliš" [75].

Stoga je u proteklih dva desetljeća razvijen niz modela baziranih na LCA pristupu specijaliziranih za analizu sustava za gospodarenje krutim komunalnim otpadom [76] koji su korišteni za cijeli niz analiza: u [77] se koristi WISARD LCA bazirani alat za odabir najboljeg sustava gospodarenja komunalnim otpadom u regiji južne Italije, model WRATE se koristio za procjenu različitih strategija za energetsku oporabu u Engleskoj [78], ORWARE za analizu sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom u švedskim općinama, EASYWASTE za usporedbu materijalne i energetske oporabe u Danskoj, EASETECH za procjenu utjecaja na okoliš postojećeg i alternativnih sustava za gospodarenje komunalnim čvrstim otpadom u Brazilu [79], itd. Za slične analize su korišteni i nespecijalizirani LCA softverski paketi za

modeliranje i analizu sustava gospodarenja komunalnim otpadom poput SimaPro za procjenu životnog ciklusa, baziranu na scenarijima, upravljanja komunalnim otpadom na otoku [80], OpenLCA za procjena utjecaja na životni ciklus odlaganja krutog komunalnog otpada na razini grada [81] te Gabi za LCA analizu sustava za gospodarenje otpadom na razini države [82].

U mnogim slučajevima se umjesto cjelokupne, komparativne, LCA analize sustava i tehnologija trebalo koristiti jednostavnije i praktičnije oblike analiza [83]. Pojednostavljeni LCA pristup koristi se u mnogim nedavno objavljenim radovima (u građevinskom sektoru [84], proizvodnji osobnih automobila [85], kao i za usporedbu sustava solarnog grijanja i hlađenja s konvencionalnim sustavima [86]) te se smatraju važnim sredstvom za prevladavanje predrasuda o kompleksnosti LCA kao i poteškoća u primjeni i razumijevanju dobivenih rezultata, od strane širih grupa ljudi te donositelja odluka.

Svi navedeni pojednostavljeni pristupi analizi životnog ciklusa uključuju i energetske pokazatelje. Energetski pokazatelji mogu se koristiti za pojednostavljenje LCA analiza te su pokazatelj utjecaja na okoliš u širokom spektru aktivnosti poput proizvodnje energije, proizvodnje materijala, prijevoza i obrade otpada [87], [88], [89]. Ovi pojednostavljeni pristupi se smatraju korisnijim u pojedinim primjenama, kao npr. u industriji, gdje se prethodno koristila vremenski zahtjevna puna LCA analiza za usporedbu proizvoda ili identifikaciju mogućih područja za poboljšanje performansi proizvoda u različitim fazama životnog ciklusa, ili u sektoru planiranja gdje, se može koristiti za analizu različitih scenarija.

Također, u LCA analizi sustava gospodarenja komunalnim otpadom na razini općine [68] se zaključuje da se treba izbjegavati izravna LCA analiza alternativnih sustava, u pogledu materijalne i energetske oporabe otpadnih materijala u korist drugih LCA baziranih pokazatelja kao što je metoda ukupne potražnje za energijom (*engl. Cumulative Energy Demand – CED*) koja se također koristi za procjenu utjecaja na životni ciklus (*engl. Life Cycle Impact Assessment – LCIA*). Ovaj zaključak je baziran na svojstvima CED metode koja ujedinjuje energetske i materijalne tokove, kao i povezane utjecaje na okoliš, u jednu veličinu te time omogućuju istovremenu procjenu i usporedbu životnog ciklusa i materijalnih i energetskih tokova. Na ovaj način omogućuje se analiza sustava koji objedinjuju potrošnju i proizvodnju energetskih i materijalnih tokova vrlo različite prirode koji nisu izravno usporedivi ili međusobno izravno zamjenjivi.

2.2.1.2. Energetska analiza

LCA metodologija za procjenu utjecaja na okoliš uvedena je prije četiri desetljeća [90] te se od samog početka potrošnja primarne energije koristi u LCA studijama kao jedan od ključnih indikatora [91]. Indikator potrošnje primarne energije, također nazvan indikatorom ukupne potražnje za energijom (CED indikatorom) ili utjelovljenom energijom životnog ciklusa (*engl. Lifecycle Embodied Energy – LEE*), također je dio inženjerskih smjernica (njemačkih VDI [92] i švicarskih SIA [93]) te europskih standarda po pitanju gradnje (EN 15804 [94], 15978 [95] i 15643-2 [96]). Međunarodna organizacija za standardizaciju navodi iscrpljivanje fosilnih energetskih resursa kao kategoriju utjecaja u ISO/TR 14047 [97], iako energetski pokazatelj nije potreban prema njezinim LCA standardima. CED se koristi za prikaz cjelokupne potrošnje primarne energije u proizvodnji promatranog proizvoda, uzimajući u obzir cjelokupni proizvodni lanac, tj. sve pozadinske procese koji direktno i indirektno sudjeluju u proizvodnji te kao takav čini koristan energetski indikator za procjenu rezultata LCA analize [98] koji je kvantitativan i obuhvaća sve energetske tokove koji utječu na životni ciklus [99]. Unatoč popularnosti, CED se definira i koristi na različite načine zbog nedostatka standardizacije. Neka od pitanja vezanih uz korištenje CED-a kao indikatora jesu: razlikuje li se (i treba li razlikovati) različite energetske vektore, koje energetske vektore (energetske ulaze) obuhvaća, kako je definirana energetska vrijednost pojedinog energetskog vektora, treba li obuhvatiti energetsku i materijalnu potrošnju energetskih izvora te analizira li potrošnju finalne energije ili potrošnju primarne energije (s aspekta resursa) [100]? Pristupi proračunu CED-a se međusobno razlikuju ovisno o odgovorima na postavljena pitanja.

CED je također posrednik za procjenu utjecaja na okoliš te korelira sa složenijim metodama procjene utjecaja na životni ciklus koje kao rezultat daju jednoznačnu vrijednost [101], [87]. Za širok raspon proizvoda CED daje konvergentne rezultate u usporedbi s drugim pokazateljima (kao što su ekološki otisak (*engl. Ecological Footprint – EF*), ukupna eksergijska ekstrakcija u prirodnom okolišu (*engl. Cumulative Exergy Extraction in the Natural Environment – CEENE*), klimatski otisak (*engl. Climate Footprint – CF*), ekološka iscrpljenost (*engl. Ecological Scarcity - ES*) i ekološki indikator (*engl. Eco-Indicator – EI*)) i daje usporedivo rangiranje utjecaja [87]. Zbog ovoga se CED može koristiti kao indikator za odabir ekološki prihvatljivije alternative [102] te kao energetski indikator za procjenu rezultata ukupne LCA analize [103], što ga čini odgovarajućim alatom za donošenje odluka [103]. Zbog toga se navodi u jednoj od

najvećih LCI baza podataka Ecoinvent [105] kao jedan od pokazatelja za sve tokove i proizvode.

Energetski pristup analizama se koristi u velikom broju do sada objavljenih radova. Pa je tako u [106] provedena analiza energetskog ciklusa sustava gospodarenja otpadom. U tom radu analizirana je energetska potrošnja sustava gospodarenja otpadom kao i sustava recikliranja čija se proizvodnja sagledava putem pripadajućih energetskih ekvivalenata. Na temelju metode ukupne eksergijske potražnje (*engl. Cumulative Exergy Demand – CExD*) iskazuje omjer energetske potrošnje i proizvodnje te zaključuje da "recikliranje otpada može proizvesti energiju" i da bi to "moglo opravdati potrošnju energije i troškove recikliranja komunalnog krutog otpada". Ovi zaključci se dovode u pitanje u [107], gdje se postavljaju pitanja "mogu li se reciklirani materijali razmatrati kao izvor energije" i "mogu li se reciklirani materijali iskoristiti za potrebe proizvodnje energije". Također, postavlja se pitanje gdje se, npr. reciklirana plastična boca, ponovno vraća natrag u upotrebu u ekonomskom lancu kako bi ispunila svoju ulogu. Ovo posljednje pitanje se temelji na mogućnosti recikliranja materijala po principu otvorene i zatvorene petlje. Isto tako, kvantifikacija energetskih ekvivalenata, za sirovine koje se uzimaju iz prirode bez prerade (poput vode) te za sekundarne materijale (proizvedene reciklirane materijale), se dovodi u pitanje.

CED je također prethodno korišten u širokom spektru različitih analiza održivosti za različite proizvode, tehnologije i usluge, kao što je analiza načina obrada nikal superlegura [108], zgrada [109], integriranih solarnih toplinskih sustava [110], građevinskih materijala [104], sustava isporuke proizvoda i usluga (*engl. Product-service systems*) kod vjetroturbina [101], spremnika toplinske energije [111], fotonaponskih solarnih sustava kroz odnos uložene energije i proizvedene energije (*engl. Energy Return on Energy Invested – EroEI*) [112], itd. Također se CED indikator u manjem broju radova primjenjuje i za analizu složenijih sustava poput sustava gospodarenja otpadom [113], gdje je CED model za donošenje odluka korišten za usporedbu različitih alternativa te donošenje odluka u gospodarenju industrijskim otpadom. U navedenom radu je zaključeno da je ovakav pristup znanstveno utemeljen te je njegova upotreba jednostavna i da ispunjava svoju ulogu. U ovom slučaju analizirane su: energetska potrošnja lanca oporabe materijala, sustava njegove energetske oporabe (putem spalionice industrijskog otpada) te ušteda energije zbog izbjegavanja proizvodnje novih primarnih materijala. CED je također korišten za usporedbu sustava gospodarenja komunalnim otpadom u dva grada [114] te je razvijena metoda jednovrijednosne energetske usporedbe u kojoj se uspoređuje analizirano

rješenje s najboljim mogućim rješenjem oporabe za svaki materijal zasebno. Iako taj pristup pokriva sve tokove otpada i tehnologije obrade u analiziranim sustavima, međukoraci (poput skupljanja otpada, transporta i separacije) nisu analizirani kao niti interakcije između pojedinih tehnologija. U [68] je pokazano da je kod analize sustava gospodarenja komunalnim otpadom poželjnije koristiti CED LCI metodu u odnosu na direktnu LCA analizu alternativa baziranih na energetskoj i materijalnoj oporabi otpada pa su tako u [69] CED LCI rezultati prikazani uz rezultate CML 2001 karakterizacijske metode.

Kao što se može vidjeti, postoji niz radova koji obrađuju širok spektar raznih ekoloških i tehno-ekonomskih analiza sustava gospodarenja komunalnim otpadom, međutim niti jedan se nije bavio praćenjem potrošnje i proizvodnje finalne, pa tako niti primarne, energije sustava u cjelini i njegovih sastavnih dijelova (tehnologija). Bioplin se uglavnom proizvodio samo pomoću jedne tehnologije i koristi se za proizvodnju električne energije, dok se širi raspon alternativa i mogućnosti nije razmatrao. Većina ranijih radova koji koriste energetske pokazatelje za procjenu energetske održivosti sustava gospodarenja otpadom, posebno sa stajališta životnog ciklusa, usredotočuju se na usporedbe sustava ili tehnologija koje se temelje na analizi energetskog ekvivalenta izbjegnute proizvodnje primarnih materijala i/ili energetskih vektora, bez obzira na oblik proizvoda i njegovu konačnu upotrebu. Naime, energetskom oporabom otpada dobivaju se sekundarni energenti koji zamjenjuju primarne dok se materijalnom oporabom zamjenjuju primarni materijali u konačnoj potrošnji. Kako bi se ove vrijednosti svele na zajedničku vrijednost, koristi se CED faktor pomoću kojega se proizvedeni materijali i energija svode na ekvivalent primarne energije. Stoga se može govoriti o izbjegnutoj proizvodnji ekvivalenta primarne energije koja je ista bez obzira kako se njezini materijalni i energetski ekvivalenti upotrebljavaju.

2.2.1.3. Održivost i utjelovljena energija

Ukoliko bi se omogućilo zasebno praćenje proizvodnje i potrošnje svakog pojedinog materijalnog i energetskog toka unutar razmatranog sustava, analiza bi se mogla proširiti i na analizu šireg utjecaja oporabljenih tokova. Na taj način, svaki energetski vektor proizveden kroz energetski oporavak može se iskoristiti ili za zadovoljavanje općih lokalnih energetskih potreba ili preusmjeriti, kako bi zadovoljio unutarnje potrebe za energijom samoga sustava gospodarenja i oporabe otpada. Na taj način se može pratiti utjecaj „zatvaranje petlje“ unutar sustava, ne samo na materijalnoj strani nego i na energetskoj strani, na konačnu održivost

proizvedenih (recikliranih) materijala. „Zatvaranje petlje“ dovodi do povećanja održivosti proizvedenog materijala što se može pratiti kroz njegovu utjelovljenu energiju (*engl. Embodied Energy - EE*). Utjelovljena energija nekog proizvoda je suma ukupne primarne energije (PE) utrošene tijekom cijelog životnog ciklusa tog proizvoda [115].

Utjelovljena energija tako uključuje energiju utrošenu u proizvodnju proizvoda, ali i energiju samih iskorištenih sirovina. Kao pokazatelj, utjelovljena energija se najčešće koristi za analizu te usporedbu održivosti u građevinskom sektoru [116]. U [117] se ovaj pristup primjenjuje za analizu strukturnih elemenata zgrade i koristi se za odabir materijala. Izazovi u izračunu utjelovljene energije u građevini, iz perspektive izvođača su elaborirani u [118]. Osim toga, pokazuje se da je inicijalno smanjenje utjelovljene energije uglavnom vezano za smanjenje utjecaja kroz materijale. Ipak, zaključuje se da odabir materijala s niskom utjelovljenom energijom može utjecati na druge utjecajne faktore, poput faze izgradnje i transporta.

Ulazno-izlazna hibridna metoda korištena je za izračun utjelovljene energije u [119], [120], [121]. U [69] prikazane su agregirane vrijednosti utjelovljene energije, ali i doprinosi po svakom energetskom vektoru. Problem s korištenjem utjelovljene energije kao indikatora je u nedosljednoj metodologiji i granicama korištenim u analizama [117], [118], [122], [123], stoga se rezultati studija ne mogu rutinski i izravno uspoređivati. Analiza utjelovljene energije je također korištena za procjenu održivosti proizvoda [124] i alternativnih izvora energije [125]. Ova analiza je svrstana pod "energetske analize" jer uzima u obzir "komercijalnu energiju" konzumiranu od strane analiziranog procesa. Budući da se u izračunu utjelovljene energije prate samo energetski tokovi, materijalni tokovi preuzeti iz okoliša neizravno se uzimaju u obzir kao energija koju je potrebno utrošiti kako bi se mogli upotrijebiti (za npr. vađenje, crpljenje, prerada, kondicioniranje, itd.). Na taj se način ne uzimaju u obzir ulazni tokovi kao što su tlo i voda, koji se ne proizvode i ne trebaju obradu, niti ljudski rad [125], [126]. U većini analiza koje se baziraju na izračunu utjelovljene energije, vodi se prema ideji da treba uzeti u obzir samo one tokove koji mogu podlijegati nestašici. Kao što se može vidjeti, pristup analizi održivosti putem utjelovljene energije je uvelike korišten za analize u građevinskom sektoru, kao i za procjenu proizvoda i alternativnih izvora energije.

2.2.1.4. Socioekonomska strana

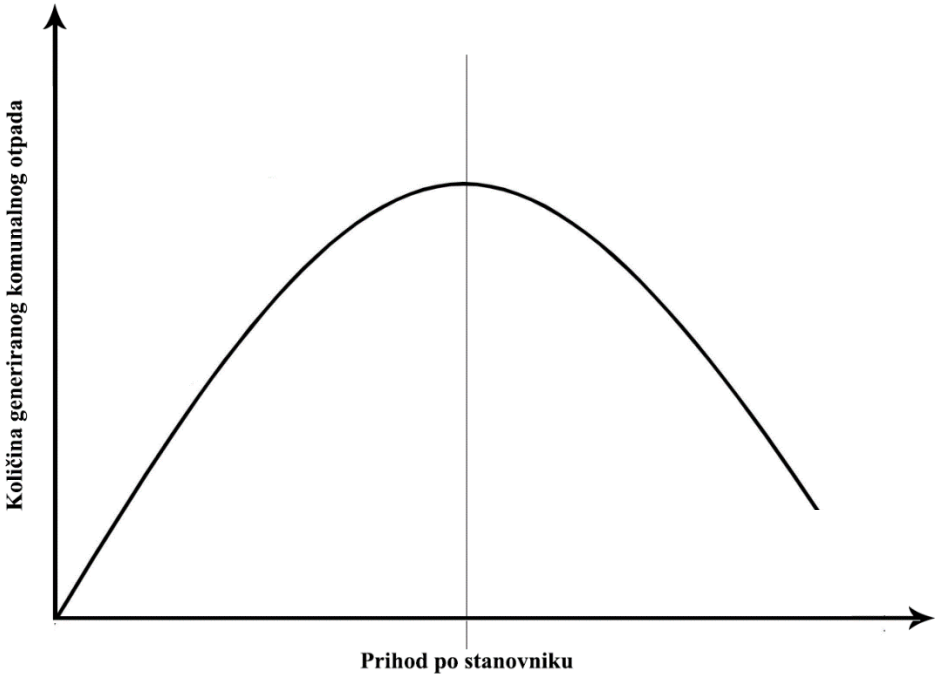
Zadovoljavanje svih prethodno navedenih ciljeva koje je postavila Europska unija pred zemlje članice zahtijeva značajne promjene u strukturi sustava gospodarenja otpadom, kao i uvođenje novih tehnologija. Ovi problemi pogotovo su naglašeni u novijim državama članicama Europske unije koje imaju problema s ispunjavanjem ciljeva iz starijih regulativa po pitanju gospodarenja otpadom. Reorganizacija sustava gospodarenja otpadom i uvođenje novih tehnologija i sustava (poput odvojenog prikupljanja tj. primarne separacije otpada, sekundarne separacije otpada, energetske oporabe te materijalne oporabe tj. recikliranja) vode do novih potencijalnih problema za općine i gradove. Jedan od najvećih problema je društveno prihvaćanje te svijest građana o važnosti gospodarenja otpadom kao i njihovo sudjelovanje u gospodarenju komunalnim otpadom kroz sheme odvojenog prikupljanja otpada [127]. S druge strane, upravljanje otpadom je aktivnost koja generira trošak kojega na kraju plaćaju korisnici sustava (građani). Zbog toga povećanje troškova gospodarenja otpadom predstavlja socioekonomski problem koji bi mogao naglasiti ili ublažiti problem društvenog prihvaćanja povećanjem ili smanjenjem troškova, a stoga i cijene prikupljanja otpada.

Zbog velike važnosti ekonomskog aspekta, tehno-ekonomska analiza strategije prikupljanja komunalnih otpada provedena je u [128]. Ovdje se sustav sakupljanja otpada detaljno analizira, ali se ne prate performanse drugih dijelova sustava gospodarenja otpadom. Rezultati još detaljnije analize troškova skupljanja otpada izneseni su u [129], međutim samo za stvarni sustav koji je implementiran u Italiji bez osvrta na alternative. Postoje i drugi radovi koji procjenjuju ekonomiju ovakvih sustava poput [130], [131], [132], [133], međutim u [130] se razmatra samo dio sustava, dok u [131], [132], [133] samo jedna tehnologija. Za razliku od prethodnih analiza, kompletna ekonomska analiza sustava gospodarenja otpadom u Japanu provedena je u [134]. U ovoj analizi elastičnost troškova je razmotrena kao funkcija količina otpada u svakoj fazi obrade (prikupljanje, prerada i odlaganje). Naglasak je stavljen na procjenu utjecaja odvajanja kućanskog otpada na troškove gospodarenja otpadom u sustavu za gospodarenje otpadom u Japanu te se ne uzimaju u obzir druge konfiguracije sustava. Ukupni trošak usluge zbrinjavanja otpada procjenjuje se u [135] na temelju podataka iz postojećih sustava u 65 općina u Španjolskoj. Osim toga, identificiran je utjecaj ekonomije razmjera (veličine) u općinama s manje od 50.000 stanovnika.

S druge strane, postoje radovi koji su analizirali različite pristupe i tehnologije za gospodarenje otpadom. Analiza različitih tehnologija gospodarenja otpadom te kapitalnih (*engl. Capital Expenditure - CAPEX*) i operativnih (*engl. Operating Expenses - OPEX*) troškova provedena je u [136], ali se u njemu ne procjenjuje utjecaj integracije tih tehnologija na cjelokupni sustav gospodarenja otpadom. Ukupna ekonomija sustava gospodarenja otpadom kroz devet različitih scenarija koje obuhvaćaju različite tehnologije je analizirana [137], međutim niti ova analiza ne uzima u obzir očekivane promjene u količini i sastavu otpada u budućnosti.

Komunalni otpad čini veliki dio ukupno generiranog otpada. Njegovo porijeklo te raznovrsni sastav postavljaju veliki izazov na sustave skupljanja, odvajanja i oporabe. Prilikom planiranja projekata u području gospodarenja i oporabe ovakvoga otpada treba uzeti u obzir buduća kretanja u količinama i sastavu otpada. Ove promjene su neizbježne zbog prethodno identificiranih legislativnih odrednica koje potiču promjene s jedne strane, ali i zbog socioekonomskih i tehnoloških kretanja koje su posljedica razvoja društva i gospodarstva.

Analize i planiranja po principu uobičajenog poslovanja (*engl. business as usual*) na globalnoj razini podrazumijeva postavljanje pretpostavke konstantnog povećanja količine komunalnog otpada s jednoličnom kvalitetom tj. sastavom. To je povezano s povećanjem proizvodnje otpada zbog rasta broja stanovnika i njihovog životnog standarda. Taj je trend već opisan Kuznetsovom krivuljom (*engl. Kuznets curve hypothesis - EKC*) koja tvrdi da gospodarski rast (koji se može definirati dohotkom po glavi stanovnika) ima negativan utjecaj na okoliš do određene točke (praga) nakon čega se utjecaj na okoliš smanjuje. Kuznetsova hipoteza je također prilagođena problemu komunalnog otpada te je definirana Kuznetsova krivulja po pitanju otpada (*engl. waste Kuznets curve hypothesis - WKC*) koja pokazuje da se kod kućanstava količina generiranog krutog komunalnog otpada može opisati istom korelacijom [138] – Slika 8.



Slika 8. Idejni prikaz Kuznetsove krivulja po pitanju otpada

Prag, koji je definiran Kuznetsovom krivuljom, već je postignut kod jednog dijela kućanstava tj. pokrajina u Japanu [138] i Italiji [139]. Ovakav trend pokazuje da rješavanje problema otpada izgradnjom novih postrojenja za njegovu obradu i oporabu može postati ekonomski neodrživo jer se već uočava kraj kontinuiranom povećanju generiranja krutog komunalnog otpada. U Europskoj uniji, iako apsolutno razdvajanje trenda generiranja otpada i ekonomskog rasta nije uočeno, veza između generiranja otpada i ekonomskih pokazatelja je slabija nego u prošlosti što ukazuje na relativno razdvajanje ovih vrijednosti [140]. Osim globalnih kretanja, političke odluke i strategije razvoja također imaju utjecaj na količine i sastav otpada. Uvođenje novih tehnologija i rješenja unutar sustava gospodarenja komunalnim otpadom usmjerenih na smanjenje proizvodnje otpada, ponovnu upotrebu otpadnih materijala i recikliranje, smanjuje količinu otpada koji treba obraditi, zbrinuti i/ili oporabiti [141].

Navedeni učinci su posebno naglašeni u novijim državama članicama Europske unije, koje moraju brzo implementirati promjene u postojeće sustave gospodarenja komunalnim otpadom kako bi postigle ciljeve zacrtane europskom legislativom. Međutim, kako je zaključeno u [142], promjena se ne može dogoditi preko noći. Novi, izmijenjeni, sustavi također trebaju biti ekonomski održivi te istovremeno, kako bi bili lakše prihvaćeni od strane stanovništva, ne bi trebali generirati prekomjerni porast troškova za građane koji bi rezultirao njihovim

neprihvaćanjem novouspostavljenih sustava. Ovakvo neprihvaćanje lako dovodi do problema poput nesudjelovanja građana u shemama odvojenog skupljanja otpada pa i ilegalnog odlaganja otpada na za to nepredviđene površine. Stoga sustav mora biti osmišljen kako bi ograničio volatilnost troškova tijekom projiciranog ekonomskog perioda (perioda otplate sustava), ali i ukupni, tj. prosječni, trošak za građanstvo.

Iz pregledane literature se može zaključiti da vremenska ovisnost količine i sastava otpada pod utjecajem promjena u sustavu gospodarenja otpadom nije dovoljno analizirana tj. uzimana u obzir prilikom tehno-ekonomskih analiza, ali i analiza utjecaja na okoliš. Količina otpada prilikom provođenja analiza se smatra konstantnom ili se jednostavno ekstrapolira iz povijesnih podataka dok promjene u sastavu otpada i njegovoj energetskoj vrijednosti u većini radova nisu uopće uzete u obzir. Važnost predviđanja količina, sastava i energetskih karakteristika otpada u planiranju sustava gospodarenja otpadom naglašena je u [143]. Na promjene u količini i sastavu otpada najosjetljivija su, po pitanju ekonomske održivosti, postrojenja s najvećim investicijskim troškom. U slučaju sustava za gospodarenje otpadom to su postrojenja za termičku obradu otpada (TOO), tj. spalionice otpada s energetskom oporabom. Postrojenja za TOO su također i najveći proizvođači energije u sustavima za gospodarenje, obradu i oporabu otpada te njihova isplativost uvelike ovisi o energetskim tržištima. Osim toga, ovakva postrojenja imaju i značajan utjecaj na energetski sustav. Uvođenje novog energetskog postrojenja, pa tako i postrojenja za energetsku oporabu otpada, dovodi do promjene u energetskom miksu[1] (*engl. energy mix*). Utjecaj promjena u energetskom miksu na okoliš analiziran je u [144]. Također, energija iz otpada analizirana je kao obnovljivi izvor energije u cijelom nizu radova [145], [146], [147], [148]. U [149] je razmatrana ekonomska analiza rada spalionica otpada. Njihova ukupna učinkovitost energetske pretvorbe je prilično niska u pregledanim radovima zbog naglaska na proizvodnji električne energije ili isključivo proizvodnje električne energije. Isto tako, u ovim radovima je utjecaj cijene koju postrojenje naplaćuje za zbrinjavanje otpada (*engl. gate fee*) analiziran samo pomoću proizvoljne analize osjetljivosti bez razmatranja utjecaja drugih parametara na njen iznos. Radovi koji su analizirali su-spaljivanje biomase s drugim gorivima, kao što je slučaj u [150], nisu analizirali zamjenu

[1] Energetski miks - Skup primarnih energetskih izvora, bilo obnovljivih ili neobnovljivih, unutar neke regije ili područja iz kojih se dobiva sekundarni energetski vektor za izravnu (finalnu) uporabu (Izvor: https://findwords.info/term/energy%20mix)

goriva s ciljem održanja ekonomske isplativosti. Isplativost pogona ovakvog postrojenja se treba analizirati i pod utjecajem drugih promjena koje se mogu očekivati, ovisno o državi, u bližoj ili daljnjoj budućnosti. Jedna od takvih promjena je, na primjer, približavanje fleksibilnom radu postrojenja s energetskom oporabom na otvorenim tržištima. Utjecaj koji elektroenergetske mrežne tarife imaju na fleksibilnu primjenu postrojenja unutar koncepta pretvorbe električne energije u toplinsku (*engl. Power-to-heat concept*) istraženi su u [151], no još se više istraživala mogućnosti rada postrojenja na otvorenom tržištu električne energije [152], [153].

Što se tiče tržišta toplinske energije, ovaj koncept još uvijek je u začetku implementacije, budući da je većina centraliziranih toplinskih sustava u javnom/gradskom vlasništvu. Međutim, čak i u ovom segmentu dolazi do diversifikacije vlasništva [154] što s vremenom vodi k uspostavi tržišta toplinske energije. Stoga je pogon otvorenog centraliziranog toplinskog sustava već analiziran u [155]. Ovo istraživanje je otvorilo pitanje mogućnosti rada kogeneracijske spalionice otpada na oba energetska tržišta što predstavlja sljedeći korak u povezivanju sektora gospodarenja otpadom i energetskog sektora.

2.2.2. Nedostaci u dosadašnjim istraživanjima

Ciljevi ovoga istraživanja su postavljeni kao rezultat prethodnog pregleda legislativnih rješenja koja su se do sada koristila te dosadašnjih istraživanja koja su provođena u području analiziranja integriranih sustava gospodarenja komunalnim otpadom te njegove materijalne i energetske oporabe. Na osnovi provedenog pregleda područja, identificirana su područja koja u prethodnim razmatranjima nisu dovoljno analizirana ili nisu uopće sagledana s određenog aspekta:

- Dok postoji veliki broj radova koji analizira gospodarenje raznovrsnim otpadom koristeći LCA pristup, mali je broj onih koji koriste CED pristup za pojednostavljenu LCA analizu, a koji je identificiran kao primjereniji za analiziranje sustava gospodarenja komunalnim otpadom, kao i donošenje odluka.

- Većina analiza ne obuhvaća cijeli sustav gospodarenja otpadom, od skupljanja preko njegova sortiranja i obrade pa do materijalne i energetske oporabe, što dovodi do toga da međusobne veze nisu modelirane te do rezultata koji ne prikazuju međusobni utjecaj tehnologija unutar cjelokupnog sustava.

- Energetski, materijalni i otpadni tokovi između tehnologija koje tvore razmatrani sustav te njihova međusobna interakcija nisu adekvatno analizirani u dosadašnjim istraživanjima.

- Analize bazirane na CED indikatoru, kao i potpune LCA analize, koriste se za statičku usporedbu proizvoda i sustava što nije prikladno za analiziranje (i donošenje odluka) dinamičnih sustava čiji ulazni i izlazni tokovi uvelike ovise o socioekonomskim, tehnološkim, organizacijskim i legislativnim parametrima koji su podložni promjenama. Vremenske promjene u količini i sastavu otpada nisu uzimane u obzir.

- Tipični rezultati CED i LCA analiza u području oporabe otpada navode samo izbjegnute utjecaje cjelokupnog sustava (gdje negativni rezultati ukazuju na potencijalne benefite za okoliš) ili međusobno uspoređuju indikatore scenarija (uspoređujući ostale scenarije s scenarijem koji ima najbolje rezultate) što izravno ne pokazuje utjecaj oporabe otpadnih materijala na „zatvaranje petlje“ u kružnom gospodarstvu.

- Zamjena primarnih goriva i energenata s ekvivalentima proizašlim iz oporabe otpada, čija je važnost za europski energetski sustav identificirana, nije adekvatno obrađena u pregledanim radovima, pogotovo ne sa stajališta primjene i moguće dodatne transformacije.

- Kako kroz kružno gospodarstvo, legislativu, pa tako i kroz pregledane radove, naglasak je stavljen na materijalno recikliranje i smanjenje uporabe primarnih sirovina. Energetski tokovi su većinom u analizama sustava gospodarenja otpadom zapostavljeni te uzeti u obzir samo prilikom razmatranja prelaska na upotrebu obnovljivih izvora energije ili uvođenja mjera energetske učinkovitosti. Prilikom analize energetske oporabe kao jedne od opcija zbrinjavanja/oporabe otpada, ovo rješenje kao i njegovi produkti u većini se slučajeva sagledavaju odvojeno od ostatka sustava obrade i oporabe otpada.

- Ekonomske analize u području gospodarenja otpadom većinom analiziraju dio sustava ili određenu tehnologiju te se u tim slučajevima utjecaj integracije analiziranih dijelova u cjelokupni sustav gospodarenja otpadom ne obrađuje. Osim toga, radovi koji u obzir uzimaju i sagledavaju cijeli sustav gospodarenja otpadom većinom se koncentriraju na analizu utjecaja promjene u jednom malom dijelu sustava na ukupnu cijenu pogona. U

pojedinim analizama je dana i usporedba ukupne cijene sustava kroz više različitih scenarija, međutim svi pregledani radovi imaju zajedničku karakteristiku da nisu uzeli u obzir promjene u sastavu i količini otpada koje se mogu očekivati u budućnosti. Utjecaj ovih promjena je neophodan, pogotovo za tehnologije koje su najosjetljivije na takve promjene - one s najvećim investicijskim troškom.

- Analizi sustava koji pružaju komunalnu uslugu se ne može pristupiti s jednakog stajališta kao analizama komercijalnih tehnologija i sustava, pošto su sustavi koji pružaju komunalnu uslugu, poput sustava za gospodarenje komunalnim otpadom, financirani javnim novcem tj. od strane korisnika usluge – građana. Pregledani radovi ovaj problem gledaju striktno s ekonomskog aspekta dok bi ovdje bio adekvatniji socioekonomski pristup.

- U dosadašnjim radovima utjecaj cijene koju postrojenje/sustav naplaćuje za zbrinjavanje otpada (*engl. gate fee*) analiziran je samo pomoću proizvoljne analize osjetljivosti bez razmatranja utjecaja drugih parametara na njen iznos.

2.2.3. Cilj istraživanja i hipoteza

U nastavku ovoga rada, nastojat će se odgovoriti na prethodno identificirane nedostatke u dosadašnjim istraživanjima u okviru ispunjavanja krajnjeg cilja doktorske disertacije koje se može definirati kao:

- Ispitati opravdanost integriranja energetske oporabe otpada u energetske sustave, tj. korištenja otpada kao energenta, u okolnostima promjena u europskoj legislativi te iz više aspekata analizirati ulogu energije iz otpada u kružnom gospodarstvu i novodefiniranom pristupu „zatvaranja petlje“ unutar europske ekonomije.

Najznačajniji aspekti koji su identificirani na temelju pregleda propisa, regulativa, inicijativa, planova, strategija i dosadašnjih istraživanja su: energetski aspekt koji ujedinjuje i analizu utjecaja, aspekt održivosti kao i socioekonomski aspekt. Stoga će se u tri glavne cjeline ove disertacije provesti zasebne analize gore spomenutih aspekata. Također, detaljnije će se analizirati srednjoročna ekonomska održivost izgradnje postrojenja za termičku obradu komunalnog otpada zbog njegove izražene osjetljivosti na vremenske promjene u količini i sastavu ulaznog goriva (otpada).

Zbog širine teme koja se obrađuje, a čiji je okvir prethodno dan u uvodnom dijelu te kroz pregled literature, nemoguće je sve identificirane aspekte održivosti obuhvatiti jednom analizom. Stoga se provedeno istraživanje sastoji od više odvojenih analiza koje tvore zajedničku cjelinu. Na taj je način istovremeno dan novi pogled na ulogu energetske oporabe u okviru kružnog gospodarstva te su provedene sve analize koje su identificirane kao važne za područje gospodarenja komunalnim otpadom.

Na temelju ovakvog koncepta istraživanja, postavlja se hipoteza: *multikriterijskom analizom može se ocijeniti opravdanost uključivanja otpada, kao lokalno dostupnog energenta, u lokalni energetski sustav u vremenu legislativnih promjena po pitanju zbrinjavanja otpada*.

3. ZNANSTVENI DOPRINOS

Temeljna ideja iza ovoga istraživanja jest analizirati energetsku oporabu otpada s novog gledišta, kao integralni dio kružnog gospodarstva, koje je do sada, sa strane pristupa „zatvaranja petlje“, pretežito promatrano s materijalne strane, na osnovu analize stvarnog sustava gospodarenja otpadom kao i energetskog sustava. Također, kroz kružno gospodarstvo, identificirana je važnost „zatvaranja petlje“ unutar europskog gospodarstva te životnog ciklusa proizvoda. Iako je kroz prethodna istraživanja i analize životnog ciklusa sustava gospodarenja otpadom prednost dana CED analizi, ispred sveobuhvatne LCA analize, pregled literature pokazao da je u malome broju radova CED indikator korišten za analizu sustava gospodarenja otpadom, pojednostavljenu LCA analizu te donošenje odluka. Te analize nisu sagledavale sustav gospodarenja otpadom kao cjelinu, što ukazuje na to da rezultati ne pokazuju utjecaj sustava u cjelini. U ponekim LCA analizama, u kojima je korišten i CED, a CED LCI rezultati su prikazani uz rezultate drugih LCA karakterizacijskih metoda - prikazani rezultati su tipični za LCA analize sustava gospodarenja otpadom te prikazuju samo izbjegnute utjecaje cjelokupnog sustava ili međusobno uspoređuju scenarije na bazi određenog indikatora što ne prikazuje doprinos kružnom gospodarstvu kao takvom. Štoviše, u većini dosadašnjih radova nisu praćeni energetski i materijalni tokovi, kao niti tokovi otpada, a niti su uzimane u obzir vremenski ovisne promjene u količini i sastavu otpada koje utječu na dugoročnu održivost integriranog gospodarenja otpadom. Stoga su se do sada provodile statičke usporede proizvoda i sustava koje nisu prikladne za analize na kojima se baziraju odluke u vezi dinamičkih sustava kao što je sustav gospodarenja komunalnim otpadom.

Kako bi se prevladalo navedene probleme i nedostatke u dosadašnjim razmatranjima ovoga područja, ova analiza uzima u obzir vremenske promjene koje su rezultat socioekonomskih, tehnoloških i regulativnih promjena u sustavu/području gospodarenja komunalnim otpadom kroz provođenje triju uzastopnih analiza koje odgovaraju vremenskim koracima definiranim europskom legislativom. Ovime su dosadašnja saznanja proširena analizom utjecaja zakonskih uvjetovanih promjena u području gospodarenja otpadom (pogotovo vezanih za učinkovitost sustava primarne separacije otpada, ali i sekundarne separacije), koje rezultiraju u promjenama udjela i količina pojedinih otpadnih materijala u komunalnom otpadu, na rad postrojenja za obradu i zbrinjavanja komunalnog otpada te na cjelokupnu sliku održivosti sustava, s

naglaskom na ulogu tehnologija energetske oporabe koja je u prethodnim razmatranjima zapostavljana.

Analize su provedene na način da su njihovi rezultati lako razumljivi te se kao takvi mogu iskoristiti za donošenje odluka. Ovo se postiglo korištenjem jednovrijednosnog CED indikatora, koji je baziran na LCA pristupu, za analizu životnog ciklusa razmatranih sustava gospodarenja otpadom na bazi kojih je izvedena energetska analiza, koja se bavi praćenjem energetskih tokova te stupnja „zatvaranja petlje“ u okviru kružnog gospodarstva te analiza održivosti koja se bavi analizom utjecaja na okoliš u okviru kružnog gospodarstva, ali i šire.

Ovaj pristup je dodatno proširen kroz praćenje utjecaja materijalne i energetske oporabe na održivost sekundarnih sirovina tj. oporabljenih materijala te je razvijen na bazi praćenja promjena u utjelovljenoj energiji recikliranih materijala. Dok prijašnji radovi analiziraju utjecaj uloge materijalne oporabe otpada (kroz smanjenje uporabe primarnih sirovina) u povećanju održivosti proizvodnje sekundarnih materijala, ovo istraživanje proširuje takav pristup na analizu utjecaja energetske oporabe otpada na održivost recikliranih materijala. Pristup putem analize utjelovljene energije je u prijašnjim istraživanjima korišten pretežito u građevinskom sektoru, dok je u ovome istraživanju po prvi puta primijenjen na paralelnu analizu utjecaja materijalne i energetske oporabe otpadnih sirovina, specifično otpadnih materijala iz komunalnog otpada. To predstavlja potpuno novi pogled na ulogu oporabe kao sastavnog dijela kružnog gospodarstva.

Kako bi se omogućila ovakva razmatranja i analize, bilo je potrebno dizajnirati scenarije na osnovu kojih će se analize provesti. U ovome radu, scenariji su, zbog identificirane važnosti gradova u europskom kontekstu, razvijeni na bazi glavnog grada jedne mlađe države članice Europske unije te su stoga korišteni realni podaci za njihovo modeliranje. Zbog toga su, ukoliko nisu bili dostupni u sklopu Ecoinvent LCI podataka, korištenjem dostupnih podataka (iz literature, izvještaja i znanstvenih radova) o pojedinim tehnologijama, proizvodima te sastavima razmatranih tokova, konstruirani ulazno izlazni podaci za razmatrane tehnologije (*engl. Unit Proces Data – UPR*) koji odgovaraju specifičnoj lokaciji.

Budući da analizirani scenariji obuhvaćaju tehnologije energetske oporabe otpada koje su sastavni dio energetskih sustava, ovaj rad također analizira (djelomičnu) zamjenu goriva na lokalnoj (gradskoj) i široj razini. Utjecaj zamjene energenata je pogotovo naglašen u kontekstu samoga sustava gospodarenja i oporabe otpada u širokom spektru primarnih energetskih

vektora – električna energija, toplinska energija, prirodni plin, stlačeni prirodni plin (SPP) (*engl. Compressed Natural Gas – CNG*), ali i dizelsko gorivo te ugljen. Ovakav put je važan za energetski sustav Europske unije, što je i naglašeno u nizu dostupnih publikacija [48], [49], [53], međutim moguće alternative nisu dovoljno analizirane. Također, ekološka pitanja, pogotovo na urbanoj razini, poput održive (zelene) infrastrukture te resursne učinkovitosti i održivosti su aktualne teme, međutim, uloga komunalnog otpada i načina gospodarenja njime nije dovoljno diskutirana [156].

Energetski sustavi igraju važnu ulogu u ovakvome holističkom pristupu „zatvaranju petlje“ – istovremeno s materijalne i energetske strane. Kroz istraživanje identificirana je jedna nova veza između energetske i materijalne oporabe otpada kroz povratnu petlju putem energetskog sustava koja omogućuje povećanje održivosti proizvedenih (recikliranih) materijala smanjenjem korištenja primarnih sirovina s naglaskom na primarne energente. Ovo predstavlja novi pogled na ulogu energije iz otpada (*engl. Energy from Waste – EfW*) u sustavima oporabe otpada i na povezivanje materijalne i energetske oporabe otpada kroz energetske sustave. Takav pristup predstavlja korak dalje od prethodnih stavova o povezanosti energetskih sustava i sustava gospodarenja otpadom.

Kako bi se omogućilo okretanje prema kružnom gospodarstvu u svim područjima, potrebno je uz okolišnu, materijalnu i energetsku održivost sagledati i pitanje ekonomske održivosti integriranih sustava gospodarenja otpadom i njegove oporabe. Međutim, pošto gospodarenje otpadom spada u sferu komunalnih usluga, njegov trošak pada na korisnike sustava tj. građane te stoga inicijalno ekonomsko pitanje pada u novo područje - područje socijalnih pitanja i problema. Zbog toga se ovo prvenstveno ekonomsko pitanje mora sagledavati sa socioekonomskog aspekta tj. s aspekta analize promjena u cijeni (troška) usluge zbrinjavanja otpada za građane. Ovakav pristup analizi utjecaja vremenskih, socioekonomskih, legislativnih i tehnoloških promjena na izdatke koje imaju građani predstavlja napredak u dosadašnjem pogledu na ovakve probleme.

Iako se prilikom razvoja metodologija za pojedine analize vodilo računa da se smanji broj potrebnih veličina za konačno donošenje odluke, tako da se u jednoj vrijednosti ocijeni što veći broj značajnih pokazatelja, što je omogućeno da se kroz međusobnu kolinearnost vrijednosti ili povezanost dvaju ili više ciljeva, kao rezultat provođenja predmetnih analiza dobije skup triju veličina, za pojedine vremenske periode, pomoću kojih je moguće rangiranje analiziranih

scenarija po određenim pitanjima. Međutim, kako bi se dobio jednoznačan odgovor o tome koji scenarij je sveukupno najbolje rangiran, scenariji su po rezultatima analiza rangirani putem pristupa multikriterijskog donošenja odluka (*engl. Multi Criteria Decision Making – MCDM*). Navedenim pristupom se, između ostalog, može potvrditi svrsishodnost usporedbe analiziranih scenarija korištenjem, upravo u ovome radu, definiranih analiza, što se vidi iz grafičkog prikaza dobivenih rezultata i međusobnom isključivanju korištenih kriterija.

4. STRUKTURA RADA

Prema prethodno objašnjenim problemima te identificiranim nedostacima u dosadašnjim istraživanjima, kao i navedenim znanstvenim doprinosima, ovaj rad je strukturiran u više međusobno zavisnih cjelina. Dijelovi korištene metodologije, kao i rezultata, već su objavljeni kao izvorni znanstveni radovi istog autora [157], [158], [159], [160] kako je definirano po logičkim cjelinama po kojima je i strukturirana metodologija ovoga istraživanja:

- Definiranje sustava [159]
- Modeliranje varijabilnih vrijednosti [157], [158], [159], [160]
- CED analiza – analiza utjecaja [159], [157]
- Analiza smanjenja utjelovljene energije - analiza održivosti [157], [159]
- Socioekonomska analiza [158], [160]
- Multikriterijsko rangiranje
- Definiranje studije slučaja i scenarija [157], [160]

Također, dijelovi istraživanja su objavljeni kao konferencijski radovi istog autora u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom [161], [162], [163], [164], [165], [166], prezentirani su na međunarodnim skupovima s objavljenim sažetkom [167] te prezentirani na poster sekcijama međunarodnih skupova s objavljenim sažetkom [168].

Na bazi rezultata provedenih analiza, koje su definirane iznesenom metodologijom, provedeno je multikriterijsko donošenje odluka bazirano na PROMETHEE II pristupu te GAIA grafičkom analizom. Temeljem rezultata multikriterijskog rangiranja potvrđen je i odabir kriterija definiranih iznesenom metodologijom, za provođenje ove analize te su izvedeni konačni zaključci istraživanja.

5. METODOLOGIJA

5.1. Definiranje sustava

5.1.1. Granice sustava i analize

Kako bi se sustav gospodarenja otpadom mogao analizirati sa strane energetskog, okolišnog te ekonomskog aspekta pa i ukupnog kružnog gospodarstva, potrebno je postaviti okvir koji obuhvaća definiranje granica sustava te razmatranih tehnologija. Ovo je učinjeno putem ulazno – izlaznih podataka specifičnih za pojedinu tehnologiju koji su povezani tako da tvore razmatrani sustav.

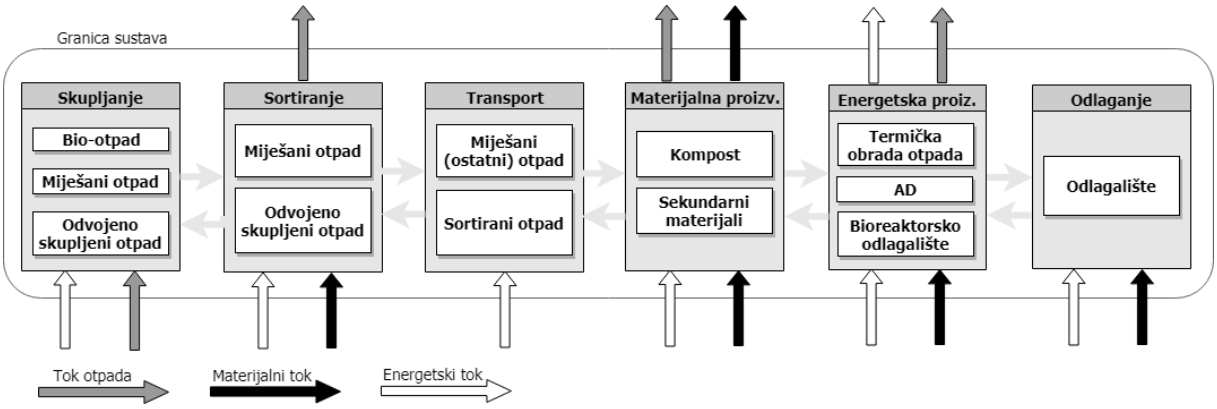
Zbog holističkog pristupa, granice sustava su postavljene tako da obuhvaćaju cjelokupni sustav gospodarenja komunalnim otpadom, od samoga skupljanja komunalnog otpada (uključujući i sve sekundarne aktivnosti: prijevoz, održavanje i popravke) preko separacije, obrade, zbrinjavanja te proizvodnje sekundarnih materijala, na strani materijalne oporabe i energije (u obliku toplinske energije, električne energije te bioplina i biometana) na strani energetske oporabe otpada. Na strani materijalne proizvodnje analiza završava s proizvodnjom materijala te niti jedna od naknadnih produkcijskih aktivnosti (kao što je pakiranje, transport, obrada te na kraju životnog ciklusa i ponovno zbrinjavanje ambalažnih materijala) nije analizirana. Proizvedeni materijali su vrednovani kroz tržišne aktivnosti za razmatrani materijal korištene LCI baze. Specifična granica sustava se razlikuje od scenarija do scenarija te je detaljno objašnjena kroz opis scenarija. Iako su scenariji napravljeni na primjeru grada, sustavi koji se proučavaju nisu geografski ograničeni samo na gradsko područje (područje generiranja otpada) već obuhvaćaju šire područje kako bi se omogućilo razmatranje šireg raspona alternativa po pitanju oporabe skupljenog otpada. Što se tiče vremenskog okvira, provedene analize koriste godišnje ulazne podatke tako da rezultati opisuju jednu godinu pogona razmatranog sustava, dok je vremenska komponenta uzeta u obzir provođenjem uzastopnih analiza. Svi ulazni materijalni i energetski tokovi nose sa sobom odgovarajući teret tj. energetsko/ekološko i/ili ekonomsko opterećenje proizašlo iz potrebnih proizvodnih i distribucijskih operacija i/ili tržišta. Što se tiče izlaznih tokova, otpadni tokovi koji nisu klasificirani kao komunalni otpad te stoga nisu zbrinuti unutar razmatranog sustava, odnosno koji presijecaju granicu sustava,

također predstavljaju okolišno i/ili ekonomsko opterećenje sukladno potrebama vanjskih tehnologija za njegovu obradu i zbrinjavanje.

U ovom je istraživanju provedeno više analiza različitih scenarija integriranih sustava gospodarenja komunalnim otpadom. Identificirane su pojedine faze unutar sustava te su izolirane tehnologije koje su njihov sastavni dio. Ovo je omogućilo praćenje energetskih i materijalnih ulaza i izlaza, kako pojedinih faza u sustavu tako i pojedinih tehnologija. Materijalni i energetski tokovi razmatranih tehnologija modelirani su na bazi podataka iz LCI baza podataka (Ecoinvent [105] i NREL USLCI [169]) kao i odgovarajućih podataka iz literature (kako je navedeno u opisu pojedinih tehnologija).

5.1.2. Analizirani sustav

Razmatrani sustavi su podijeljeni u nekoliko faza – skupljanje otpada, sortiranje otpada, transport otpada, materijalna proizvodnja, energetska proizvodnja i transformacije te faza odlaganja otpada – Slika 9. Zbog različitih konfiguracija pojedinih tehnologija, moguće je da pojedina tehnologija sudjeluje u radu različitih faza.

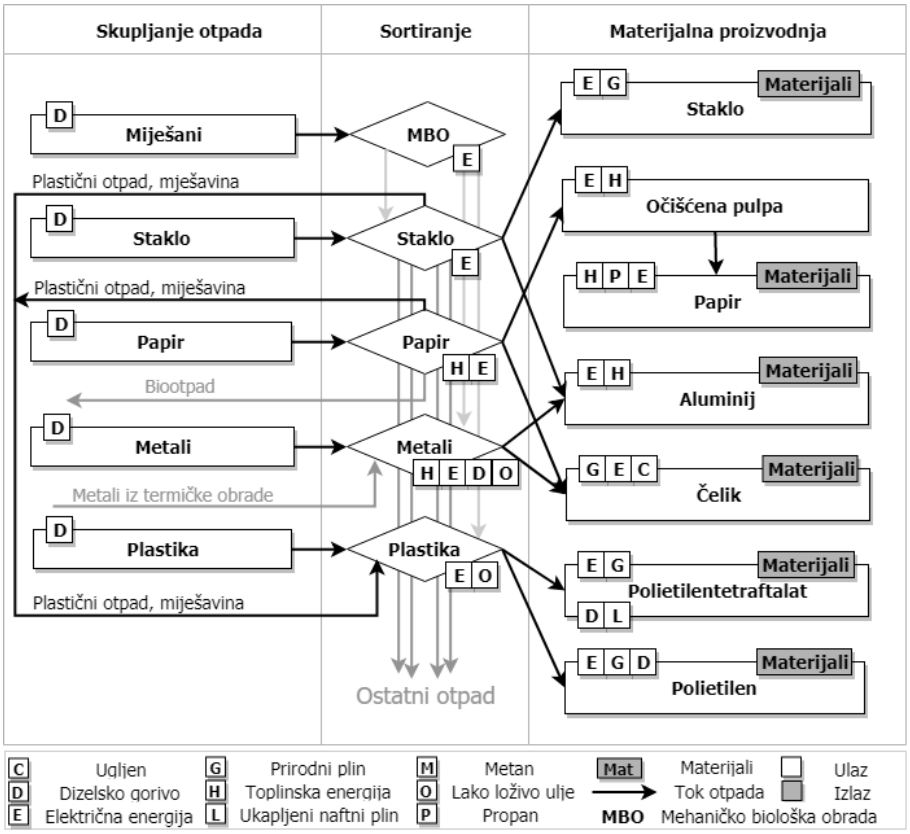


Slika 9. Faze razmatranog sustava i njegove granice

Ulazi u fazu prikupljanja komunalnog otpada sastoje se od prikupljenog otpada te goriva (dizel goriva) koje se koriste u kamionima za skupljanje otpada. Ostali potrebni tokovi, poput tokova povezanih s održavanjem, su internalizirani u aktivnosti održavanja koja je integralni dio aktivnosti skupljanja otpada te sadrži sve materijalne i energetske ulaze i izlaze kao i generirane otpadne tokove koje je potrebno zbrinuti. Isti način modeliranja je korišten i za modeliranje transporta otpada i sekundarnih sirovina iz otpada (sortiranog otpada) gdje je jedina razlika u nedostatku ulaznog toka otpada koji presijeca granicu analiziranog sustava.

Faza razvrstavanja otpada se sastoji od svih tehnologija za razvrstavanje svih frakcija komunalnih otpada koje su prethodno skupljene kroz sustav odvojenog skupljanja (primarne separacije otpada), koje se naknadno koriste u lancu materijalne oporabe, kao i skupljenog miješanog komunalnog otpada u postrojenja za mehaničko-biološku obradu (MBO). Ova faza se sastoji od više tehnologija razvrstavanja te ima mnogo više unutarnjih tokova otpada, koji nisu prikazani na Slika 9, koji ju povezuju s drugim fazama i tehnologijama, što je prikazano na Slika 10. Na ovoj slici prikazan je i dio tehnologija s kojima su navedene tehnologije povezane.

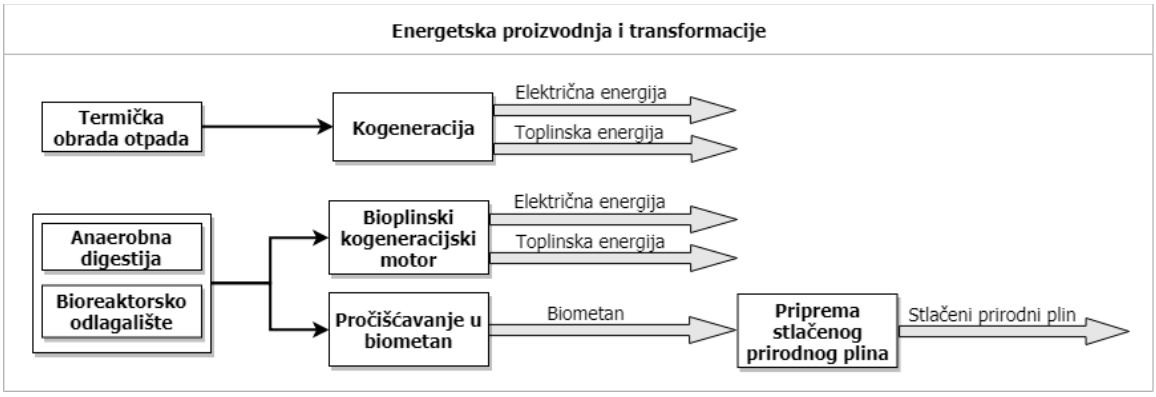
Otpadni tokovi na Slika 9, koji presijecaju granicu su procesno specifični tokovi otpada koji ne pripadaju kategoriji komunalnog otpada te zahtijevaju posebno zbrinjavanje/obradu te se stoga moraju obraditi izvan sustava. Ulazni tokovi obuhvaćaju energetske tokove, tj. sve oblike energetskih vektora potrebnih za rad tehnologija za sortiranje, i materijalne tokove, koji obuhvaćaju sve potrošne materijale potrebne za rad postrojenja, kao i materijale potrebne za njihovo održavanje.



Slika 10. Tehnologije sortiranja otpada te primjer njihovog povezivanja u sustav

Faza materijalne proizvodnje obuhvaća sve tehnologije koje imaju materijalne proizvode kao izlazni tok, koji presijeca granicu sustava. U ovoj kategoriji su sva postrojenja za kompostiranje i materijalno recikliranje. Proizvodnja recikliranog materijala je modelirana i praćena do proizvodnje materijala, a ne konačnog proizvoda (npr. do proizvodnje polietilentetraftalat (PET) peleta, a ne PET proizvoda poput ambalaže (boce)).

Sve tehnologije koje uključuju proizvodnju i transformaciju energije su uključene u fazu energetske proizvodnje. Proizvodi ove faze su energetski izlazi u obliku topline, električne energije, bioplina ili odlagališnog plina. Električna i toplinska energija se mogu direktno koristiti za pokrivanje potreba za finalnom energijom dok su bioplin i odlagališni plin energetski oblici koji se trebaju transformirati unutar sustava u druge energetske oblike poput električne i toplinske energije, biometana ili pak stlačenog prirodnog plina (SPP), kako je prokazano na Slika 11.



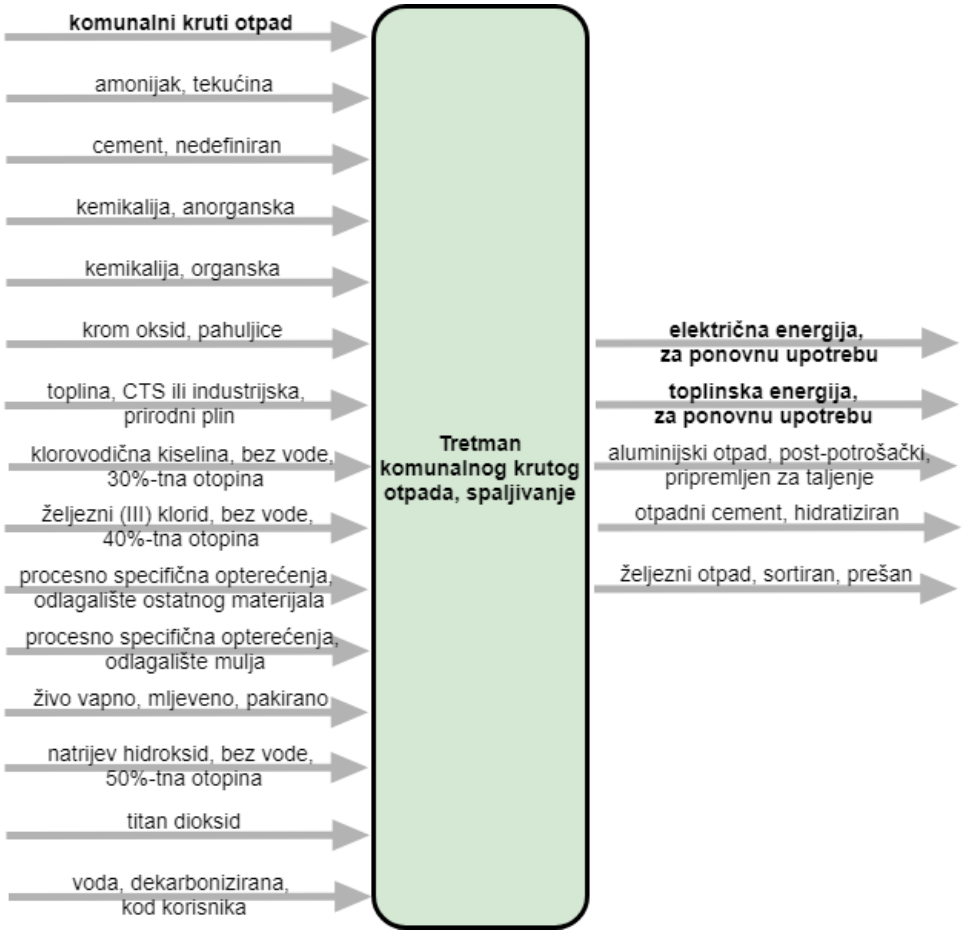
Slika 11. Transformacije proizvedenih energetskih vektora

Razmatrane tehnologije uključuju postrojenje za TOO s kogeneracijskom proizvodnjom električne i toplinske energije (*engl. Combined Heat and Power – CHP*), bioplinsko postrojenje za anaerobnu digestiju (AD), odlagalište otpada sa sustavom prikupljanja odlagališnog plina, kogeneracijsko postrojenje s bioplinskim motorom, postrojenje za pročišćavanje bioplina u biometan, postrojenje za pripremu SPP te termičku obradu otpada u cementari. Ova zadnja mogućnost predstavlja alternativu koja, iako spada u energetsku oporabu otpada, nema izlaznog energetskog toka. Ovdje se otpad koristi kao zamjensko gorivo u cementari.

Posljednja faza analize je zbrinjavanje otpada, koja obuhvaća odlagalište otpada. U ovoj fazi se, ovisno o razmatranom scenariju, može proizvesti odlagališni plin, koji se pretvara u druge energetske oblike u fazi energetske proizvodnje, sukladno Slika 11.

5.1.3. Modeliranje tehnologija

Slika 9 – Slika 11 prikazuju, po fazama, sve tehnologije koje su bile uzete u obzir u ovoj analizi. Koje tehnologije su sadržane unutar pojedine faze ovisi o pojedinom scenariju. Većina podataka o tehnologijama preuzeta je iz LCI UPR podataka iz Ecoinvent LCI baze podataka [105] dok su tehnologije za materijalnu oporabu polimernih materijala definirane na bazi podataka iz NREL USLCI baze [169]. U slučaju sortiranja mješovitog otpada, MBO postrojenje je modelirano na temelju podataka dostupnih u literaturi [170]. Svi ulazni i izlazni energetski, materijalni i otpadni tokovi definirani su UPR podacima koji su prikazani u primjeru kogeneracijskog postrojenja za TOO – Slika 12.



Slika 12. Ulazni i izlazni tokovi tehnologija definirani LCI UPR setom podataka

Podaci iz Ecoinvent LCI baze su kompletni i precizni koliko pružatelji podatka (većinom industrija) omogućuju te prikazuju sve dostupne podatke o pojedinoj tehnologiji i proizvodu.

Zbog toga ona ne uključuje kvantitativne kriterije isključivanja (*engl. Cut-off criteria*[2]) [171]. Isti pristup je korišten kada potrebni podaci nisu bili dostupni putem LCI baza podataka te su podaci iz dostupne literature korišteni za izradu potrebnog seta podataka. Za razliku od Ecoinvent, USLCI baza je prihvatila pravilo po kojem uključuje barem 95% ulaznih materijalnih i energetskih tokova u procesni set podataka [172]. Sva daljnja izuzeća u ovome istraživanju se izbjegavaju uključivanjem svih raspoloživih i dostupnih podataka o lokalnom procesu kako je napravljeno i kod prikupljanja podataka za Ecoinvent bazu. Dakle, uzevši u obzir sva spomenuta ograničenja, ova analiza nema određene kvantitativne kriterije isključivanja.

Postoje neki problemi kada se koriste različiti izvori LCI podataka [173]. Dok su se neki od njih izbjegli uključivanjem svih raspoloživih podataka u upotrjebljene skupove podataka, drugi se rješavaju prilagođavanjem pribavljenih skupova podataka lokalnim uvjetima i usklađivanjem s odgovarajućim materijalnim i energetskim tokovima (proizvodima) kao i lokalnim tržišnim aktivnostima u bazi podataka Ecoinvent. Jedna od olakotnih okolnosti proizašla iz korištenja upravo Ecoinvent i USLCI baza za modeliranje sustava je u tome što je format USLCI podatkovnog modula jednostavnija verzija EcoSplod proračunske tablice koja se koristi u bazi podataka Ecoinvent, što omogućava lakše zajedničko korištenje ovih dvaju izvora podataka [174].

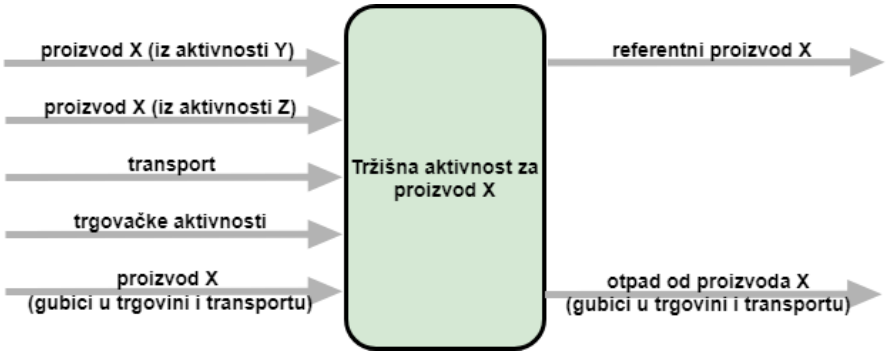
Za modeliranje sustava korišteni su europski i lokalni UPR i LCI podaci i prilagođeni kako bi odgovarali sastavu lokalnog otpada te rezultirajućoj ogrjevnoj vrijednosti otpada, proizvodnji bioplina i odlagališnog plina kao i udjelu metana u proizvedenim energentima. Podaci o sastavu otpada, preuzeti iz lokalnih izvješća o komunalnom otpadu, su također korišteni za prilagodbu podataka za tehnologije sortiranja otpada, na način da izlazni materijalni tokovi (sortirani otpadni materijali) odgovaraju sastavu lokalnog miješanog komunalnog otpada kao i odvojeno prikupljenih frakcija otpada (npr. količina separiranog aluminija i čelika odgovara njihovim udjelima u otpadu). U slučaju termičke obrade otpada, za izračun ukupne ogrjevne vrijednosti ulaznog toka u spalionicu korištene su ogrjevne vrijednosti i količine (udjeli) miješanog

[2] Specifikacija količine materijala, protoka energije ili razine ekološke važnosti povezane s procesom ili sustavom proizvoda koji će biti isključeni iz studije. (ISO, 2006a, EN ISO 14040:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and frameworks. July 2006.)

komunalnog otpada, mulja iz procesa AD, visokokalorijske frakcije otpada iz MBO tj. goriva iz otpada (GIO) (*engl. Refuse Derived Fuel – RDF*) te ostatnog otpada, čiji je izračun rađen posebno za svako razmatrano vremensko razdoblje. Količine pojedinog otpada su izračunane iz stvarnih količina prikupljenog otpada ili prognoziranih količina u budućem razdoblju te tehnoloških podataka svake pojedine tehnologije u lancu. Buduće količine komunalnog otpada i njihov sastav projicirani su pomoću LCA-IWM prognostičkog modela [175].

Na temelju toga i podaci za postrojenja za MBO prilagođeni su na način da izlazni materijalni tokovi (sortirani otpadni materijali) odgovaraju sastavu lokalnog miješanog komunalnog otpada u razmatranom periodu. Isto tako je rad postrojenja lokaliziran na način da su ulazni i izlazni tokovi povezani s proizvodima s lokalnih tržišta te energentima s lokalnim energetskim miksom. To je učinjeno na način da je svaki pojedini ulaz i izlaz iz pojedine tehnologije (opisan UPR setom podataka) povezan s lokalnom tržišnom aktivnošću za razmatrani proizvod opisan u Ecoinvent bazi.

Tržišna aktivnost, kako je modelirana u Ecoinvent bazi, je aktivnost koja ne mijenja ulaze već prenosi međuizmjenu iz jedne transformacijske aktivnosti u drugu koja konzumira predmetnu međuizmjenu kao ulaz. Primjer takve aktivnosti je prikazan Slika 13 i opisan u daljnjem tekstu.



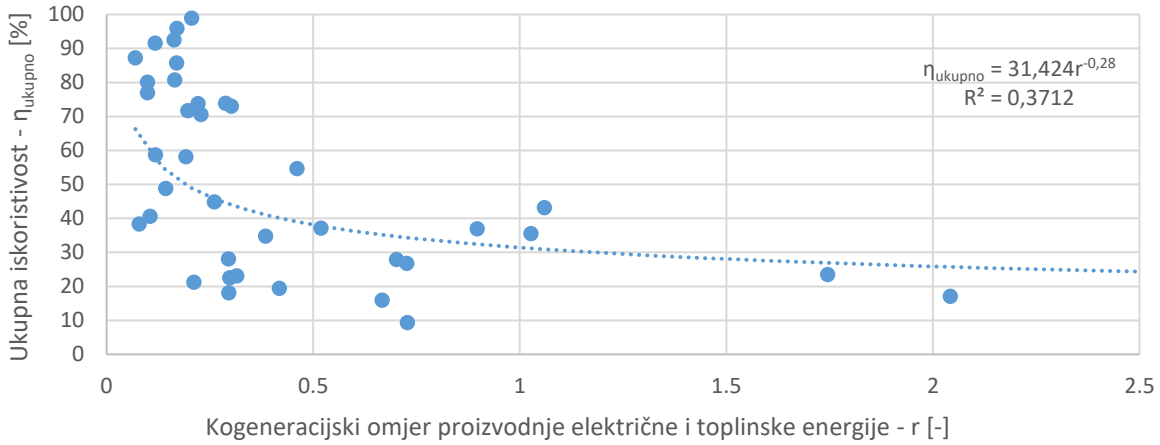
Slika 13. Primjer definicije tržišne aktivnosti u Ecoinvent bazi

UPR LCI skup podataka za tržišnu aktivnost prikuplja sve aktivnosti s istim referentnim proizvodom u određenoj zemljopisnoj regiji. Isto tako, uključuje prosjek transportnih aktivnosti povezanih s tim proizvodom na specifičnoj lokaciji kao i ulaze samoga proizvoda za pokrivanje gubitaka nastalih u trgovini i transportu. Postoje globalne i lokalne tržišne aktivnosti, ovisno o stvarnim uvjetima kao i dostupnosti lokalnih transformacijskih aktivnosti za specifični proizvod. Na ovaj način se uzimaju u obzir utjecaji svih potrebnih međuaktivnosti koje prethode

uporabi pojedinog proizvoda na određenoj lokaciji – od proizvodnje, transporta, prerade i transformacija. Osim toga, povezivanjem ulaza ostalih proizvodnih aktivnosti s lokalnim tržištima premošćuju se razlike koje proizlaze iz uporabe različitih podataka (podataka iz različitih izvora definiranih za različite lokacije) za modeliranje specifičnog sustava.

Isto je napravljeno i za ostale uključene tehnologije u analiziranim sustavima, poput sortiranja odvojeno skupljenih frakcija komunalnog otpada. U ovome slučaju određeni podaci o sastavu i generiranju određenih frakcija otpada nisu bili praćeni lokalnim izvješćima te su modelirani na temelju pregleda statističkih podataka o metalnim pakiranjima [176] za udio aluminija i čelika u metalnom otpada te na temelju UPR podataka za postrojenja za sortiranje plastičnog otpada za klasificiranje specifičnih količina pojedinih plastičnih frakcija u plastičnom otpadu.

Promjena u ulaznim količinama i sastavu otpada direktno utječe i na tehnologije za energetsku oporabu otpada gdje promjene u količini i sastavu direktno utječu na proizvodnju energetskih vektora. Osim toga, na proizvodnju ovakvih postrojenja veliki utjecaj ima i korištena tehnologija i njene karakteristike što je rezultat velikog raspona iskoristivosti energetskih transformacija. Ovo je identificirano najviše kod termičke obrade otpada čija ukupna iskoristivost jako ovisi o kogeneracijskom omjeru proizvodnje električne i toplinske energije, ali i korištenoj tehnologiji. Zaključak je izveden iz podataka Međunarodne asocijacije za kruti otpad (*engl. The International Solid Waste Association – ISWA*) [177] za veći broj postrojenja za termičku obradu u Europi prikazanih na Slika 14.



Slika 14. Podaci o iskoristivosti postrojenja za TOO

Iz prikazanog grafičkog prikaza podataka na Slika 14, vidljivo je da kod kogeneracijskog postrojenja za termičku obradu otpada dolazi do smanjenja ukupne iskoristivosti energetske transformacije s povećanjem proizvodnje električne energije (povećanja omjera kogeneracijske proizvodnje električne i toplinske energije) tj. da s povećanjem proizvodnje električne energije dolazi do smanjenja ukupne iskoristivosti postrojenja. Ovo ponašanje je na navedenom dijagramom aproksimirano prikazanom krivuljom (i njenom jednadžbom) dobivenom putem regresijske analize metodom najmanjih kvadrata s pripadajućim korelacijskim koeficijentom R^2.

Pošto se razmatra izgradnja novoga postrojenja, korišteni UPR podaci modelirani su na bazi modernog postojećeg kogeneracijskog postrojenja za TOO u Sønderborgu s kogeneracijskim omjerom 0,22 te ukupnom iskoristivosti od 90,5% [178]. Stoga su na bazi podataka o ulaznom sastavu otpada izračunane energetske vrijednosti ulaznog otpada te iz toga, na osnovu tehnoloških podataka postrojenja, i energetska proizvodnja.

Za razliku od ostalih postrojenja za energetsku oporabu koji su dio razmatranog sustava gospodarenja otpadom, cementara je vanjsko postrojenje koje obavlja uslugu termičke obrade otpada. Ovakva vrsta postrojenja s mogućnošću suspaljivanja GIO uz primarna goriva nije opisana u korištenim LCI bazama te su stoga UPR LCI skupovi podataka definirani na način da su podaci za cementaru iz Ecoinvent baze adaptirani prema [105], gdje su analizirane perspektive i ograničenja korištenja cementara za termičku obradu GIO. U navedenom radu iznesena je kemijska karakterizacija pojedinog goriva, prijenosni faktori te emisije u okoliš iz postrojenja sukladno udjelu suspaljivanja GIO u odnosu na različite vrste ugljena. Prema dobivenim podacima napravljen je novi set LCI UPR podataka za cementaru u kojoj je zamijenjeno 50% korištenog ugljena s GIO (sukladno ogrjevnoj vrijednosti).

Zadnji stupanj sustava gospodarenja komunalnim otpadom predstavlja odlagalište otpada koje je u Ecoinvent bazi opisano kao uređeno odlagalište otpada sa sustavom skupljanja odlagališnog plina koji se naknadno spaljuje na baklji. Pošto je u ovome istraživanju analiziran sustav u kojem se skupljeni odlagališni plin koristi za daljnje energetske transformacije, postojeći LCI UPR skup podataka je izmijenjen prema [179]. Navedena literatura predstavlja dio kompilacije faktora zagađenja zraka Agencije za zaštitu okoliša Sjedinjenih Američkih Država (*engl. United States Environmental Protection Agency - USEPA*) (AP-42) koji se odnosi na odlagališta komunalnog otpada te sadrži matematički model za procjenu nekontroliranih i kontroliranih

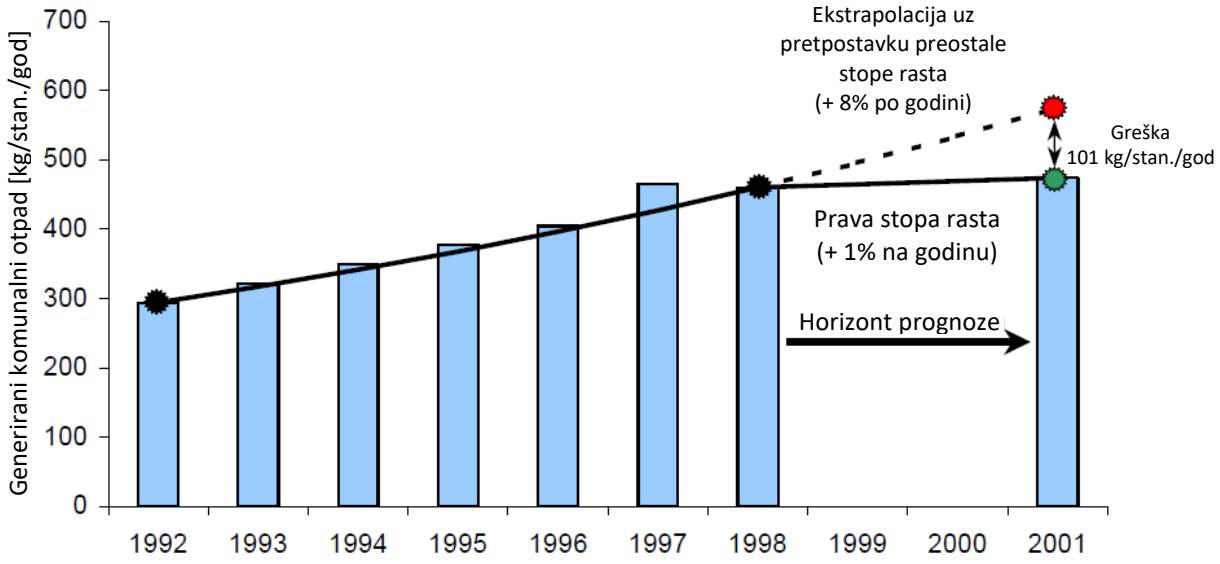
emisija odlagališta te faktore smanjenja emisija sukladno načinu kontroliranja emisija. Koristeći ove podatke emisije vezane za spaljivanje odlagališnog plina na baklji su oduzete od vrijednosti iskazanih u skupu podataka. Uz to, na predmetni LCI UPR set podataka, dodana je vrijednost generiranog odlagališnog plina koja je izračunana kako je opisano u poglavlju 5.2.

Aktivnosti prikupljanja i transporta otpada su također modelirane na bazi LCI UPR podataka za aktivnost skupljanja komunalnog otpada čija je vrijednost potrošnje goriva adaptirana sukladno dostupnim podacima o lokalnoj potrošnji goriva kamiona za skupljanje otpada, dok je potrošnja u transportu otpada modelirana na bazi dostupnih podataka o potrošnji kamiona ovisno o napunjenosti [180]. Transportne udaljenosti nisu modelirane pošto većina razmatranih objekata nije izrađena, dok se postojeći objekti planiraju premjestiti. Iz tog razloga, transportne udaljenosti su modelirane kao udaljenost do 20 km za transport komunalnog otpada unutar grada te 250 (± 200) km za međugradski prijevoz. Međugradski prijevoz je većinom korišten za prijevoz GIO u cementaru te za prijevoz sortiranih frakcija komunalnog otpada u postrojenja za materijalnu oporabu pošto su takva postrojenja locirana izvan grada. Održavanje kamiona je modelirano na bazi LCI podataka za 28-tonski kamion za aktivnost skupljanja otpada te na bazi 40-tonskih kamiona za transport otpada.

5.2. Modeliranje varijabilnih vrijednosti

5.2.1. Količina i sastav otpada

Uobičajeno prakticirani način predviđanja količina komunalnog otpada uzima u obzir (pretpostavlja) prirast stanovništva te dugoročno kretanje količine generiranog otpada po stanovniku, koji se jednostavno ekstrapoliraju tijekom razmatranog vremenskog intervala. Ovaj jednostavni i brzi pristup zanemaruje ostale značajne pokazatelje o temeljnim društvenim i gospodarskim kretanjima koje utječu na promjenu količine generiranog komunalnog otpada [181]. Slika 15. prikazuje prilično ekstremni primjer grada Poznana u Poljskoj gdje je ovakva ekstrapolacija pogrešnog trenda dovela do pogreške od 101 kg otpada po stanovniku u samo tri godine.



Slika 15. Greška ekstrapolacije količine generiranog komunalnog otpada – Poznan, Poljska [175]

Iako niti napredni modeli za prognoziranje ne mogu spriječiti pogreške u prognozi (pogotovo s povećanjem vremenskog intervala prognoze), razmatranje skupova socioekonomskih pokazatelja dovodi do znatnog smanjenja pogreške predviđanja [182]. Zbog toga je u ovome istraživanju korišten prognostički model LCA-IWM [175] za predviđanje promjene u količini i sastavu skupljenog komunalnog otpada. Ovaj model smanjuje pogrešku predviđanja uzimajući u obzir široki raspon dostupnih socioekonomskih parametara koji su navedeni u Tablica 1.

Tablica 1. Utjecajni indikatori na rezultate projekcije količine i sastava generiranog komunalnog otpada

Utjecajni indikatori na nivou grada i države	
- Ukupna populacija stanovništva	- Gustoća stanovništva
- Starosna struktura stanovništva (0 do 14 godina / 15 do 59 godina / preko 60 godina)	- Zaposlenost po sektorima (poljoprivreda / industrija / uslužni sektor)[1]
- Bruto društveni proizvod	- Stopa smrtnosti dojenčadi
- Broj noćenja	- Očekivana životna dob
- Prosječna veličina kućanstva	- Stopa nezaposlenosti

[1] Značajno samo na nivou države

Bruto društveni proizvod kao pokazatelj ekonomske snage regije često je korišten za procjenu kretanja generiranja otpada te je ta veza najviše izražena u razvijenim gradovima. Socijalni pokazatelji su po prvi puta korišteni u LCA-IWM prognostičkom modelu pri procjeni generiranja otpada. U razvoju ovoga modela identificiran značaj faktora smrtnosti dojenčadi, očekivanog životnog vijeka stanovništva i udjela zaposlenih u poljoprivredi u prognoziranju generiranja otpada, osobito u zemljama u istočne Europe. Ti su pokazatelji korisni zbog pristupačnosti te kvalitete podataka i predvidljivosti. Pokazatelji dobne strukture su se također pokazali važnima. Pozitivan odnos između povećanja udjela dobne skupine 15 do 59 godina (tj. dobne skupine s najvišom ekonomskom aktivnošću) i količine proizvedenog otpada koji je identificiran kroz korišteni model potvrđuju prethodna istraživanja [183]. Osim toga i prosječna veličina kućanstva je značajan pokazatelj jer mali broj ljudi koji žive u prosječnom kućanstvu također povećava količinu generiranog komunalnog otpada [184].

Identificirana greška predviđanja, koja je testirana na bazi povijesnih podataka, pokazuje da povećanje vremenskog horizonta prognoze povećava i generiranu grešku pa tako srednja greška prognoze iznosi 5,3% za prognoze u generiranju otpada s horizontom od 5 do 10 godina unaprijed, a 7,7% za prognoze u generiranju otpada čiji je horizont pomaknut na 11 do 22 godine unaprijed. Ova greška predviđanja generiranja otpada po stanovniku od 8% (R^2 = 0,65) je značajno manja od razine greške koju generiraju slični modeli (14% kod analize generiranja otpada u njemačkim gradovima [183] ili R^2 = 0,49 kod prognoze generiranja otpadnog papira u Austriji) [185].

Upotrebom navedenog modela te postavljanjem rubnih uvjeta definiranim europskom Direktivom o odlagalištima otpada i Okvirnom direktivom o otpadu za razdoblje do 2020. godine te Paketom kružnog gospodarstva za razdoblje do 2030. godine u projekciju su također uneseni regulativni ciljevi. Ovako postavljeni rubni uvjeti utječu na količine odvojeno skupljenog otpada te limitiraju količine deponiranog otpada u projiciranoj godini. Kao izlazni rezultati dobiju se podaci o masi generiranog miješanog komunalnog otpada po frakcijama kao i ukupnog komunalnog otpada iz čega se lako izračuna i količina pojedine odvojeno skupljene frakcije.

5.2.2. Ogrjevna vrijednost

Na bazi dobivenih vrijednosti, za uporabu u daljnjim analizama, potrebno je izračunati i energetske parametre generiranog otpada. Sastav i donja ogrjevna vrijednosti (*engl. Lower Heating Values – LHV*) otpada su međusobno povezani putem kemijskog sastava što je iskazano Mendelievom jednadžbom [186] - jednadžba (1).

$$H_d = 4{,}187\big(81C + 300H - 26(O - S) - 6(9H + W)\big)\ [\frac{kJ}{kg}] \qquad (1)$$

Kako bi se primijenila ova jednadžba potrebno je znati kemijski sastav otpada čija se ogrjevna vrijednost traži. Kemijski sastav pojedine frakcije komunalnog otpada dobiven je na bazi podataka iz [187] te je prikazan u Tablica 2.

Tablica 2. Kemijski sastav otpada po frakcijama

Frakcija otpada	**Kemijski sastav – maseni udio[1]**						
	%W	%C	%H	%O	%N	%S	%Pepeo
Papir i karton	23,00	33,11	5,39	33,88	0,15	0,02	4,45
Staklo	2,00	0,49	0,10	0,39	0,10	0,00	96,92
Metali	3,00	4,37	0,58	4,17	0,10	0,00	87,79
Plastika i kompoziti	20,00	48,00	8,00	18,24	0,00	0,00	5,76
Organski otpad:							
- Biootpad	75,00	11,68	2,00	9,72	0,53	0,03	1,04
- Vrtni otpad	65,00	16,73	2,10	13,30	1,19	0,11	1,58
Ostali materijali	20,50	20,91	2,39	12,78	0,40	0,10	42,93

[1] Bazirano na podacima iz [187]

Zbog ovako definiranog načina izračuna donje ogrjevne vrijednosti ukupnog miješanog komunalnog otpada, kao i ostatnih tokova otpada te goriva iz otpada, izračunani su na bazi udjela pojedinih frakcija. Što se tiče ogrjevne vrijednosti ostatnog mulja iz procesa AD biootpada (digestata), njena vrijednost je preuzeta iz Ecoinvent LCI baze za tehnologiju termičke obrade digestata te iznosi 2,42 MJ/kg.

5.2.3. Prinos biometana

Što se tiče prinosa biometana, on je generiran kroz dvije odvojene tehnologije: putem odlagališta sa sustavom prikupljanja odlagališnog plina i putem postrojenja za AD.

Prinos odlagališnog plina je modeliran koristeći LandGEM model uz pretpostavku ograničenja perioda skupljanja bioplina na 30 godina. LandGEM model je model za procjenu ukupnih emisija odlagališnog plina, metana, ugljičnog dioksida, nemetanskih organskih spojeva (NMOC) kao i pojedinačnih onečišćivača zraka iz odlagališta miješanog komunalnog otpada. Ovaj model je razvijen od strane USEPA te ga koriste operatori i vlasnici odlagališta kako bi utvrdili je li odlagalište podložno kontrolnim zahtjevima saveznih standarda. Ovaj model može koristiti podatke specifične za pojedino odlagalište ili zadane parametre ukoliko nema dostupnih lokalnih podataka. LandGEM model koristi jednadžbu brzine razgradnje prvog reda kako bi procijenio godišnje emisije tijekom specificiranog razdoblja – jednadžba (2).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \tag{2}$$

, gdje su

Q_{CH4} – godišnja količina generiranog biometana u godini kalkulacije [m^3/godini]

i – vremenski korak od jedne godine

n – (godina kalkulacije) - (godina inicijalnog zaprimanja otpada)

j – vremenski korak

k – brzina generiranja metana ili stopa raspada [$godina^{-1}$]

L_0 – potencijal generiranja metana [m^3/t]

M_i – masa prihvaćenog otpada u i-toj godini [t]

t_{ij} – starost j-otog dijela mase otpada Mi prihvaćene u i-toj godini (godine izražene u decimalnom zapisu)

Iz jednadžbe (2) vidljivo je da dvije veličine određuju ukupno generiranje biometana te njegovu vremensku distribuciju. Koeficijent stope raspada k i potencijal generiranja metana L_o. Koeficijent stope raspada k modeliran je za miješani komunalni otpad te je stoga za stopu raspada uzeta vrijednost 0,04 što rezultira u generiranju 70% ukupno moguće količine bioplina u roku od 30 godina u regijama s više od 630 mm oborina godišnje [189]. Druga veličina je potencijal generiranja metana L_o koja je modelirana na bazi udjela vrsta biootpada u miješanom komunalnom otpadu te izračunan specifično za svaki analizirani sustav kao i vremenski korak analize sukladno projiciranim vrijednostima udjela pojedine vrste biootpada u mješavini. Ukupna količina bioplina izračunana je korištenjem jednadžbi (3) i (4).

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} \times \left(\frac{1}{\frac{P_{CH_4}}{100}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$Q_{ukupno} = Q_{CH_4} + Q_{CO_2} \quad (4)$$

, gdje su

Q_{CO2} – količina generiranog ugljičnog dioksida [m^3]
Q_{CH4} – količina generiranog biometana [m^3]
P_{CH4} – udio metana u bioplinu [%]
Q_{ukupno} – količina generiranog bioplina [m^3]

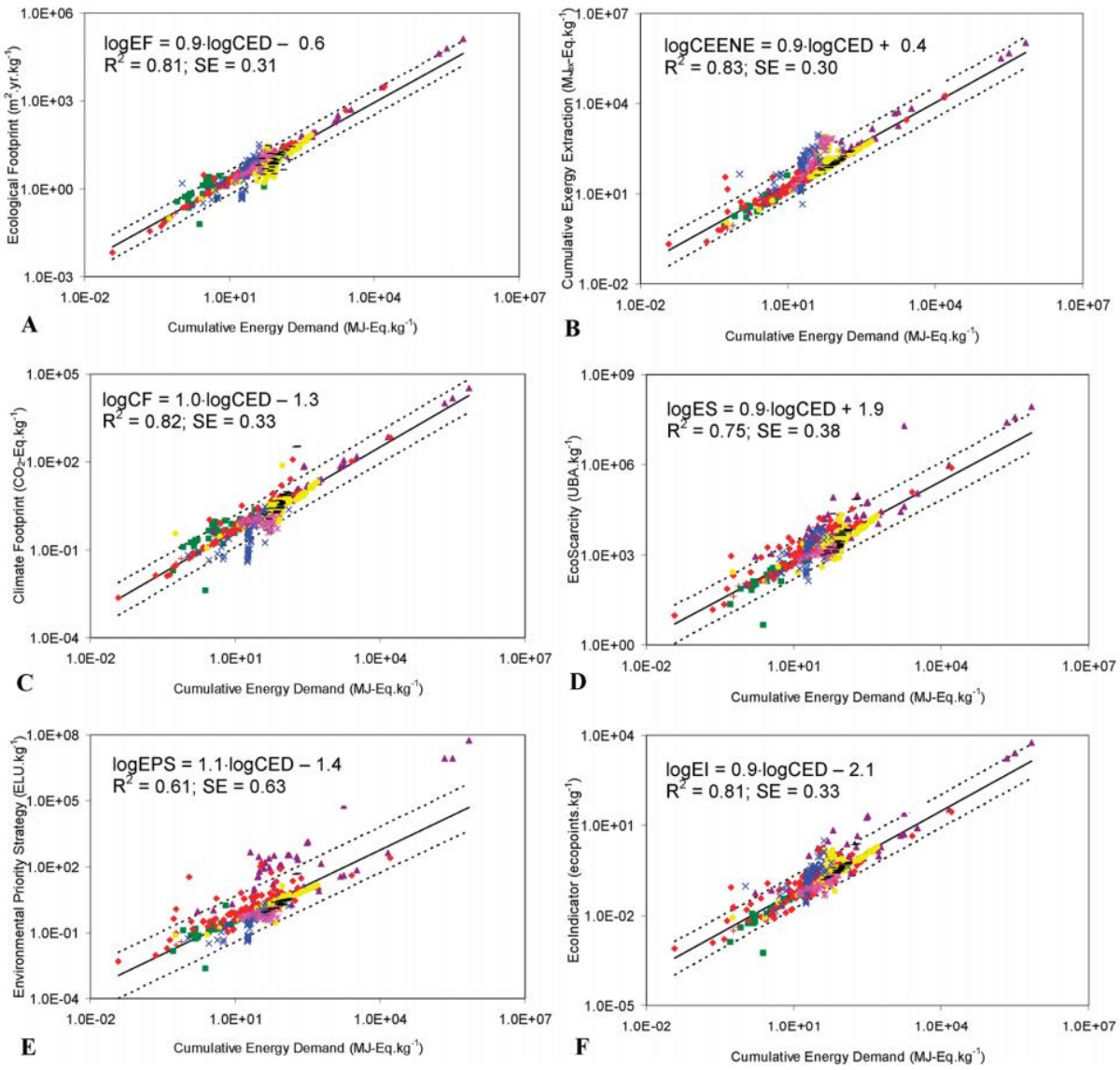
Dok je kod analize utjecaja analiziranih sustava na sigurnost isporuke sirovina, utjecaja na okoliš te na „zatvaranje petlje“ kroz ponovnu uporabu oporabljenih materijalnih i energetskih sirovina, čime se također potiče industrijska simbioza, gledana emisija odlagališnog plina kroz naredno razdoblje, za socioekonomsku analizu je bilo potrebno napraviti iznimku u razmatranju postojećeg sustava. Zbog analize postojećeg stanja, nije bilo moguće zanemariti povijesni otpad te je stoga za izračun emisija odlagališnog plina u predmetnoj godini pretpostavljeno odlaganje istih količina otpada u prethodnom razdoblju. Prethodno opisanim modelom se također mogu odrediti i udjeli ostalih plinova (polutanata) u razmatranom bioplinu.

Na sličan način je određena i vrijednost generiranog bioplina iz odvojeno sakupljenog otpada organskog podrijetla koji se obrađuje u zasebnom bioplinskom postrojenju na principu anaerobne digestije, tj. korišten je isti matematički model, ali bez vremenske distribucije generiranja bioplina. U odnosu na odlagalište sa sustavom skupljanja odlagališnog plina, ovdje se mogu održavati adekvatni uvjeti potrebni za učinkovito provođenje procesa zbog čega dolazi do brže razgradnje te iskorištavanja većine potencijala generiranja metana. Zbog specifičnosti ovoga procesa, koji se bazira na šaržama, ukupna proizvedena količina bioplina se generira u istoj godini u kojoj je biootpad i obrađen. Naknadne energetske transformacije bioplina modelirane su na bazi kogeneracijskog postrojenja s bioplinskim motorom za transformaciju bioplina u električnu i toplinsku energiju, postrojenja za pročišćavanje bioplina u biometan te postrojenja za komprimiranje biometana u SPP. Sve ove tehnologije su opisane na bazi UPR LCI podataka iz Ecoinvent baze.

5.3. CED analiza – analiza utjecaja

Prethodno opisana metodologija, koja opisuje granice sustava koji je sagledan u ovoj analizi, kao i način definiranja pojedinih tehnologija, ali i sustava u cjelini, omogućuje provođenje daljnjih razmatranja po principu analize životnog ciklusa.

Kako je već prethodno identificirano, direktnu usporedbu alternativnih sustava gospodarenja otpadom u pogledu direktne energetske i materijalne oporabe treba izbjegavati u korist drugih indikatora već predloženih i opisanih LCA okvirom poput CED-a [68]. Osim toga, CED pristup je identificiran kao dobar alat za donošenje odluka i odabir ekološki prihvatljivijih alternativa [104], [124] te također kao indikator za procjenu utjecaja na okoliš te procjenu ukupnih LCA rezultata [99], [101], [103]. Značajnu ulogu u tome ima i jednostavnost prikaza jednodimenzijskih rezultata koje daje kao i lakoća razumijevanja takvih rezultata. Iako je CED energetski pokazatelj, služi i za analizu utjecaja materijala, kao i njihove proizvodnje, na okoliš. Ovo je analizirano u [101] te je zaključeno da rezultati CED analize koreliraju s drugim LCA metodama procjene utjecaja na okoliš te daje usporedivo rangiranje rezultata za široki spektar materijala i proizvoda. Ova korelacija dana je na primjeru grafičkog prikaza linearne regresije s 90%-tnim intervalima podudaranja rezultata s ostalim najpoznatijim metodama procjene utjecaja na okoliš – Slika 16.



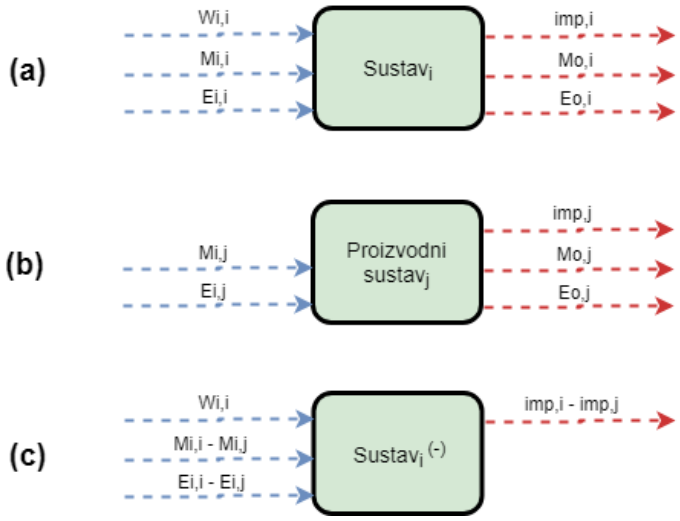
Reprinted with permission from Huijbregts MAJ, et.al. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production, Environmental Science & Technology. Copyright 2010 American Chemical Society.

Slika 16. Dijagrami linearne regresije – korelacija CED analize s drugim LCA metodama procjene utjecaja na okoliš s 90 postotnim intervalima točnosti podudaranja (točkasta linija) za 65 poljoprivrednih proizvoda (×); 42 građevinska materijala (■), 11 staklenih materijala (+); 121 anorgansku kemikaliju (♦); 146 organskih kemikalija (●); 33 plastična materijala (-); 51 metal (▲); i 29 papirnih i kartonskih materijala (*) za CED u usporedbi Ekološkim otiskom (*Ecological Footprint – EF)*) (A), Ukupnom eksergijskom ekstrakcijom iz prirodnog okoliša (*Cumulative Exergy Extraction in the Natural Environment – CEENE*) (B), klimatskim otiskom (*Climate Footprint – CF*) (C), Ekološkom iscrpljenošću (*Ecological Scarcity - ES*) (D), Strategijom ekološkog prioriteta (*Enviromental Priority Strategy – EPS*) (E) i Ekološkim indikatorom (*Eco-Indicator – EI*) (F) [87].

Slika 16. pokazuje visok stupanj podudaranja rezultata za 498 različitih materijala uključujući i 11 vrsta staklenih, 33 plastična, 51 metalni te 29 kartonskih i papirnatih materijala. Navedene vrste materijala, uz biološku komponentu, čine većinu materijala koji čine komunalni otpad. Između ostaloga, sagledana je i podudarnost s 121 anorganskom kemikalijom u čiju skupinu spadaju i umjetna gnojiva čija proizvodnja se, po količini aktivnih sastojaka, može zamijeniti proizvodnjom komposta te digestata iz organskog otpada u ovome istraživanju. Upravo zbog svega navedenog CED je izabran kao osnovni pristup za ocjenu utjecaja na okoliš životnog ciklusa proizvoda te analiziranje uloge energetske oporabe u „zatvaranju petlje“.

Budući da je ovo istraživanje bazirano na scenarijskom pristupu, za njihovo modeliranje razmatranih sustava te njihovu usporedbu korišten je atribucijski pristup, dok je za razmatranje multifunkcionalnosti te alokacije utjecaja i koristi proizvodnje sekundarnih materijalnih i energetskih tokova koji su intrinzično multifunkcionalni, korištena metoda proširenja sustava [188]. To znači, uzimanje u obzir utjecaja na okoliš povezanog s razmatranim aktivnostima gospodarenja otpadom u usporedbi s izbjegnutim utjecajima koji se odnose na smanjenje potrošnje materijalnih sirovina kao i primarne energije. Ovaj pristup je prikazan Slika 17(a), gdje je prikazano proširenje sustava gospodarenja i oporabe otpada za otpad (*Wi,i*) (usluga obrade otpada *Wi,i* koja određuje funkcionalnu jedinicu). Sustav također proizvodi materijalne (*Mo,i*) i energetske (*Eo,i*) izlazne tokove (proizvode) te za to zahtjeva određene materijalne (*Mi,i*) i energetske (*Ei,i*) ulaze. Istovremeno prouzrokuje određene utjecaje na okoliš (*imp,i*).

Ovako proizvedeni materijali se uobičajeno proizvode iz primarnih materijala putem proizvodnog sustava *j* koji također ima određene materijalne i energetske ulaze (*Mi,j; Ei,j*) kao i izlaze (*Mo,j; Eo,j*) te utjecaje na okoliš (*imp,j*) - Slika 17(b). U skladu s načelom atribucijskog modela, uobičajeni (prosječni) procesi u pozadinskom sustavu ovih proizvodnih sustava su korišteni za njihovu karakterizaciju. Ovi ulazi i izlazi iz alternativnog lanca proizvodnje, za suproizvode koji se proizvode također kroz sustav gospodarenja i oporabe otpada, oduzimaju se od istovrsnih ulaza i izlaza sustava gospodarenja i oporabe otpada – Slika 17(c).



Slika 17. Proširenje sustava gospodarenja otpadom *i* (a), koji proizvodi neke komplementarne materijalne (*Mo,i*) i energetske (*Eo,i*) proizvode te prouzrokuje određene utjecaje (*imp,i*), s proizvodnim sustavom *j* koji proizvodi iste proizvode (b) te rezultirajući prošireni sustav (c)

Ovo je pristup koji se koristi u uobičajenim LCA analizama, međutim ovakvo proširenje tj. supstitucija unutar sustava kako bi se riješio problem višefunkcionalnosti, s kreditiranjem izbjegnutih tereta, nije pogodna za usporedbu različitih sustava gospodarenja otpadom u smislu direktne proizvodnje energije ili materijala [68]. Kada se različiti sustavi (Slika 17(a)) povezuju s izbjegnutim teretima povezanim s proizvodnjom istih proizvoda kroz alternativne sustave (Slika 17(b)), rezultirajući sustav koji se zapravo uspoređuje kroz LCA analizu zapravo ne proizvodi niti energiju niti materijale (Slika 17(c)) pa stoga nije prikladno uspoređivati te sustave u smislu izravno generirane električne energije ili količina recikliranog materijala. Iz navedenog se ne može zaključiti da je oporaba energije i materijala uzeta u obzir niti kvantificirana kroz usporednu LCA analizu, iako su oni uzeti u obzir kroz izbjegnute utjecaje vezanih uz proizvodnju materijala i energije zamijenjenih njihovom suproizvodnjom (uz pružanje usluge zbrinjavanja otpada) koji su pripisani sustavu.

Kao što se može vidjeti zamjena *Ei,j* i/ili *Pi,j* s oporabljenim proizvodom iz otpada *Ei,i* i/ili *Pi,i* je vrednovana kroz negativan utjecaj (–*imp,j*). Ovi izbjegnuti tereti se stoga, nakon oduzimanja, pojavljuju i na ulaznoj strani proširenog (usporednog) sustava te je sustavu i dodijeljen negativan materijalni (–*Mi,j*) i energetski ulaz (–*Ei,j*) zbog izbjegnute potrošnje materijala i energije.

Ovaj pristup je u ovome istraživanju adaptiran na način da se samo izlazi razmatranog sustava vrednuju prema opisanom načinu, s prosječnim utjecajima povezanim uz materijale/energente na lokalnom tržištu (pošto zamjenjuju njihovu proizvodnju), a ne da se sustavi odmah međusobno povezuju. Na taj način se analizirani sustav može neovisno pratiti kao i njegova potrošnja i proizvodnja sukladno lokalnim uvjetima. Suštinska različitost između ulaza i produkata u sustave se zaobilazi njihovim svođenjem na ekvivalent primarne energije istoga proizvoda na lokalnom tržištu putem CED indikatora. Na taj način, proizvodnja proizvoda Eo,i i Mo,i, vrednuje se utjecajima proizvodnje iste količine proizvoda Eo,j i Mo,j izražene kao ekvivalent PE. Daljnjim sumiranjem navedenih ekvivalenata kao i ekvivalenata primarne energije za Ei,i i Mi,i (što je opisano jednadžbama u nastavku) indirektno se postiže opis sustava kao što je opisano Slika 17.

Pristup koji se koristi za izračun CED-a u ovome radu, sukladno u uvodnom dijelu postavljenim pitanjima vezanim za korištenje CED-a kao LCA indikatora [100], uključuje korištenje resursa tj. njihove utjelovljene energije praćenjem potrošnje fosilnih, nuklearnih i obnovljivih izvora energije u njihovom životnom ciklusu – od ekstrakcije iz zemlje, prerade sirovina i proizvodnje pa do korištenja. Proizvodnja/uporaba energije iz obnovljivih izvora određena je putem krajnje proizvedene energije, za energente iz kojih se energija oslobađa kemijskim putem više ogrjevne vrijednosti te na principu potrošnje urana pomnoženim s njegovom energetskom vrijednošću za energente čija se energija oslobađa procesom fisije [189].

Također, uzimajući u obzir prethodno objavljena pitanja vezana za vrednovanje recikliranih materijala putem energetskih pokazatelja [107], u ovome istraživanju materijalna oporaba je vrednovana kroz izbjegnutu potrošnju energije koja nije utrošena zbog smanjenja udjela proizvodnje materijala iz primarnih sirovina tj. kao razlika između energije koju je potrebno utrošiti za proizvodnju primarnih i sekundarnih (recikliranih) materijala. Kako bi se izbjeglo pitanje vrste i načina korištenja konačnih proizvoda, materijalna oporaba je razmatrana samo do razine proizvodnje materijala, a ne do konačnog proizvoda. Vezano za uporabu prirodnih resursa poput vode, njihova upotreba je uzeta u obzir kroz potreban utrošak energije za dovođenje i korištenje razmatranog resursa u određenoj tehnologiji.

Sukladno prethodno opisanom okviru, na bazi LCA pristupa uspostavljen je model na osnovu kojega se mogu pratiti energetski i maseni tokovi unutar sustava, ali i njegova interakcija s okolišem. Na osnovu dobivenih ulaznih i izlaznih materijalnih tokova, ali i tokova finalne

energije moguće je provesti analizu održivosti sustava na temelju primarne energije. Ekvivalent primarne energije se izračunavao pomoću CED vrijednosti za tržišne aktivnosti iz Ecoinvent baze podataka. U ovom slučaju koristio se standardni pristup za izračun CED-a [109].

Razmatrani sustavi gospodarenja otpadom, kao i povezani procesi, su izolirani na način da prikupljeni komunalni otpad (miješani i odvojeno prikupljeni) ulaze u analizirani sustav bez ekološkog ili ekonomskog opterećenja te samo s utjelovljenim karakteristikama. Stoga se ova analiza može opisati kao analiza od vrata do groba (*engl. gate-to-grave*) ili od vrata do kolijevke (*engl. gate-to-cradle*) ovisno o tome je li otpadni materijal zbrinut na odlagalište ili oporabljen, što proizlazi iz uporabe LCA pristupa na integrirani sustav gospodarenja otpadom [190], [191].

Svi ulazni i izlazni tokovi koji presijecaju granicu sustava svedeni su na ekvivalente primarne energije. Proizvedeni reciklirani materijali vrednovani su kao zamjena za primarne materijale s lokalnog tržišta tj. kao njihov ekvivalent PE, a isto vrijedi za energetske vektore čija se proizvodnja preračunala u primarnu energiju na temelju lokalnog energetskog miksa i LCI podataka [105]. Što se tiče kompostiranja te digestata iz procesa AD, pošto ne postoje alternativne proizvodnje ovih produkata, njihova proizvodnja je vrednovana putem njihovog kemijskog sastava te količina dušika (N), fosfora (P) i kalija (K) u proizvedenom kompostu/digestatu. Količine N, P i K u proizvedenom kompostu/digestatu su određene na osnovi podataka iz [192] te su prema dobivenim vrijednostima smatrane zamjenom za umjetna gnojiva te vrednovane kao ekvivalent njihove utjelovljene energije [193]. Osim materijalnih i energetskih tokova, na isti način su i tokovi otpada, koji nisu bili klasificirani kao komunalni otpad te koji presijecaju granicu analize, reducirani na ekvivalent potrošnje primarne energije tehnologije za njihovo zbrinjavanje ili obradu.

Iz razloga što su neke od faza obično lokalno bazirane (kao što su skupljanje, sortiranje i energetska oporaba), što je još više naglašeno u urbanim područjima, dok druge (kao što je proizvodnja sekundarnih materija) nisu fizički povezane s područjem proizvodnje i skupljanja otpada, energetska potrošnja sustava prikupljanja, sortiranja te energetske oporabe i transformacije odvojeno su praćene od materijalne oporabe. Na taj način zadovoljavanje lokalnih energetskih potreba sustava gospodarenja otpadom (generiranog unutar gradskog područja) može se pratiti zasebno od potreba cijelog sustava gospodarenja i oporabe otpada.

Svaki energetski vektor se prati zasebno na granici svake pojedine tehnologije (kako se konzumira/proizvodi), što je omogućilo kvantificiranje ispunjavanja potrebe za svakim

energetskim vektorom tj. njegovom finalnom energijom (FE). Ovo omogućuje razlikovanje potreba za pojedinačnim energetskim vektorima.

Proizvodnja svih energetskih vektora (*Ep*) je praćena te sumirana za svaki energent (E_l), svaki scenarij (*i*), varijantu (*j*) i vremenski korak (*k*). Isto je učinjeno i po pitanju potrošnje energije (*Ec*) za svaku tehnologiju i fazu. Ove vrijednosti su zatim svedene na vrijednosti ekvivalenata primarne energije korištenjem CED faktora za odgovarajući energetski vektor, kako je prikazano u jednadžbama (5) i (6). Usporedbom ovih dviju vrijednosti, procjenjuje se pokrivenost potrošnje primarne energije u razmatranom sustavu putem energije oporabljene iz komunalnog otpada.

$$Ep_{ijk} = \sum_{l=1}^{n} E_l \text{ x } CED_l \tag{5}$$

$$Ec_{ijk} = \sum_{l=1}^{n} E_l \text{ x } CED_l \tag{6}$$

Svi UPR podaci su prilagođeni da za ulaz od 1 kg toka koji definira funkcionalnu jedinicu procesa, tako da množenje odgovarajućeg UPR faktora tehnologije s ulaznim otpadnim tokom definira vrijednosti energetskih (*E*), materijalnih (*M*) i te otpadnih (*W*) tokova (jednadžbe (7) – (9))

$$E_{\mathrm{i}} = UPR_{\mathrm{i}} \times Q_{\mathrm{w}} \tag{7}$$

$$M_{\mathrm{j}} = UPR_{\mathrm{j}} \times Q_{\mathrm{w}} \tag{8}$$

$$W_{\mathrm{k}} = UPR_{\mathrm{k}} \times Q_{\mathrm{w}} \tag{9}$$

, gdje Q_w predstavlja tehnološki ulaz otpadnog materijala u kg otpada.

Svi ulazni tokovi u tehnologije, osim tokova otpada koji su klasificirani kao unutarnji tokovi i koji ne presijecaju granicu analiziranog sustava, svode se na ekvivalent primarne energije putem CED faktora te zbrajaju. Također, ovdje su uključeni i izlazni tokovi otpada koji ne pripadaju kategoriji komunalnog otpada te su stoga zbrinjavani putem vanjskih tehnologija. Na taj se način se izračunava ukupna potrošnja primarne energije tehnologije (PEC) (*engl. Primary Energy Consumption*) - jednadžba (10),

$$PEC = \sum_{i=1}^{n}(E_i \times CED_i) + \sum_{j=1}^{m}(M_j \times CED_j) + \sum_{k=1}^{l}(W_k \times CED_k) \quad [MJ] \tag{10}$$

, gdje su

E - iznos energetskog ulaza,
M - količina materijalnog ulaza, te
W - izlaz otpadnih tokova, koji nisu klasificirani kao MSW.

Jedinice pojedinih veličina nisu definirane pošto se razlikuju od razmatranog toka do razmatranog toka, stoga CED faktori moraju biti svedeni na odgovarajuću jedinicu toka.

Svi izlazni materijalni i energetski tokovi su također reducirani na ekvivalent primarne energije pomoću CED faktora i sumirani. Ovi tokovi predstavljaju proizvode tehnologija te time i proizvodnju primarne energije (PEP) (*engl. Primary Energy Production*) - Jednadžba (11),

$$PEP = \sum_{i=1}^{n}(E_i \times CED_i) + \sum_{j=1}^{m}(M_j \times CED_j) \quad [MJ] \tag{11}$$

, gdje su

E - izlazni energetski tok, a
M - izlazni materijalni tok tehnologije.

U slučajevima koji su analizirani u ovom istraživanju, sagledane su četiri vrste izravnih energetskih proizvoda (električna energija, toplina, bioplin i odlagališni plin), šest materijalnih reciklata (staklo, papir, čelik, aluminij, PET i HDPE) te kompost i digestat. Ovisno o razmatranom materijalu i korištenoj tehnologiji, proizvedeni materijali nisu 100% reciklirani te, u manjoj ili većoj količini, u njihovoj proizvodnji su potrebni i primarni materijali i sirovine. To ne predstavlja problem za razvijeni model jer je svaka tehnologija posebno opisana s odgovarajućim ulaznim i izlaznim tokovima, tako da u slučaju djelomično reciklirane proizvodnje, primarne sirovine sa sobom nose vlastita okolišna opterećenja te potrošnje primarne energije koje se integriraju u proizvedeni sekundarni materijal.

Zbrajanjem PEC i PEP faktora svih tehnologija u lancu, faktor povrata primarne energije (PER) (*engl. Primary Energy Return*) analiziranog integriranog sustava gospodarenja komunalnim otpadom je izračunan - jednadžba (12).

$$PER = \sum_{i=1}^{n} (PEC_i - PEP_i) \quad [MJ] \tag{12}$$

Dok PEC, PEP i PER faktori mogu pomoći u procjeni održivosti različitih faza i tehnologija unutar sustava gospodarenja i oporabe otpadom, još razumljiviji indikator za donošenje odluka je definiran - indeks povrata primarne energije (PERI) (*engl. Primary Energy Return Index*). PERI se računa dijeljenjem rezultirajućeg faktora povrata primarne energije s primarnom energijom potrebnom za proizvodnju odbačenih materijala koji su ušli u promatrani sustav (jednadžba (4)) te je korišten za usporedbu razmatranih scenarija – jednadžba (13).

$$PERI = \frac{PER}{\sum_{i=1}^{n} (W_i \times CED_i)} \tag{13}$$

5.4. Analiza smanjenja utjelovljene energije – analiza održivosti

Prethodno iznesena metodologija predstavlja prigodan način za analiziranje održivosti sustava gospodarenja i oporabe otpada te procjenu rezultata LCA analize, ali ona ne govori puno o ulozi oporabe otpada u kružnom gospodarstvu te cijelom kontekstu „zatvaranja petlje“. Problem sa sustavima gospodarenja otpadom je u različitosti ulaznih i izlaznih tokova koji se sastoje od širokog spektra različitih materijala kao i njihovih mješavina, ali i energetskih tokova. Prethodno opisana metodologija omogućava rješavanje ovoga problema svođenjem svih tokova na istu mjernu jedinicu – jedinicu energije. Na taj način se mogu vrednovati i izlazni tokovi (proizvodi) ovoga sustava te se može opisati njihova održivost. Energetski i materijalni proizvodi ovoga sustava imaju svoju ulogu u europskoj ekonomiji, međutim, iako raznovrsni, mogu imati i međusobni utjecaj na održivost što je i analizirano u ovome dijelu.

Ovo istraživanje prati materijalne i energetske tokove svake faze i kvantificira utjecaj uporabe sekundarnih sirovina, energetskih i materijalnih, kao i proizvoda njihove oporabe na industriju proizvodnje sekundarnih materijala. „Zatvaranje petlje“ na materijalnoj strani, tj. smanjenje uporabe primarnih sirovina i energije povezane s njihovom ekstrakcijom i transformacijom

zbog skraćenog proizvodnog lanca, može uvelike smanjiti utjelovljenu energiju proizvoda. Korak dalje može biti napravljen putem „zatvaranja petlje“ na energetskoj strani – uporabom energije oporabljene iz otpada za zadovoljavanje energetskih potreba integriranog sustava gospodarenja otpadom pomoću energetske povratne petlje putem energetskih sustava. Izračuni utjelovljene energije su napravljeni na bazi podataka iz analize materijalnih ulaznih/izlaznih tokova te su napravljeni zasebno za slučaj kada je uzeta u obzir samo materijalna oporaba i za slučaj kada se istovremeno u lancu recikliranja koriste oporabljeni materijali i energija.

Svi ulazni i izlazni tokovi (energetski i materijalni) koji se izmjenjuju s okolinom (tehnologijama izvan analiziranog sustava) svode se na primarnu energiju pomoću CED faktora. Utjelovljena energija recikliranog materijala izračunava se zbrajanjem potrošnje primarne energije svake tehnologije koja je dio sustava gospodarenja i oporabe otpada za analizirani reciklirani materijal. U ovom izračunu sumirane su primarne energije svih tokova koji se razmjenjuju s okolinom, što rezultira ukupnom potrošnjom primarne energije za proizvodnju analiziranog recikliranog materijala. Pored svih potrebnih ulaznih tokova, sve tehnologije proizvode izlazne tokove u obliku otpadnih materijala koje trebaju adekvatno zbrinuti. Ti izlazni otpadni tokovi, koji se ne mogu klasificirati kao komunalni otpad i stoga obraditi unutar analiziranog sustava, također su svedeni na ekvivalent primarne energije povezan s vanjskim tehnologijama za tretiranje predmetne vrste otpada i nadodani na prethodni iznos.

Kako bi se usporedila utjelovljena energija recikliranog materijala (i) s utjelovljenom energijom primarnog materijala, svi ulazni energetski (E_k) i materijalni tokovi (M_m) aktivnosti u lancu gospodarenja otpadom i njegove materijalne oporabe (j) za analizirani materijal (i) su preračunani u primarnu energiju i sumirani. Svi izlazni otpadni tokovi (W_n) koji moraju biti obrađeni/zbrinuti izvan granica sustava su također svedeni na ekvivalent primarne energije i nadodani na prethodni iznos. Vrijednost utjelovljene energije primarnih materijala je preuzeta iz CED LCI skupa podataka Ecoinvent baze [105] – svi izračunani energetski tokovi odgovaraju utjelovljenoj energiji predmetnog materijala/energetskog vektora.

Pošto ova analiza obuhvaća cijeli integrirani sustav gospodarenja otpadom, kako bi se analizirala utjelovljena energija svakog recikliranog materijala (i) treba se riješiti problem definiranja granica sustava specifičnih za svaki pojedini materijal. Glavni problem u ovome je predstavljala podjela materijalne (m) i energetske potrošnje (k) kao i proizvodnje otpada (n) po

materijalnim frakcijama otpada u tehnologijama za separaciju otpada. Ovo podjela je napravljena po masi separiranog otpada na način da je energetska potrošnja tehnologije (*j*) podijeljena s ukupnim materijalnim izlazom (mo_{uk}) za određenu tehnologiju (*j*) te pomnožena s masom materijala (*mo*) te specifične tehnologije (*j*) koja sudjeluje u proizvodnji analiziranog recikliranog materijala (*i*). U ovim izračunima, količine biootpada su zanemarene pošto biomasa nije materijal koji može biti analiziran kao reciklabilni materijal u kontekstu „zatvaranja petlje“. Ovaj izračun je pokazan jednadžbom (13).

$$Erec_{\mathrm{i}} = \sum_{j=1}^{o} \left(\sum_{k=1}^{p} \frac{E_{\mathrm{kj}} \times CED_{\mathrm{kj}}}{mo_{uk_{\mathrm{j}}}} \times mo_{ij} + \sum_{m=1}^{q} \frac{M_{\mathrm{mj}} \times CED_{\mathrm{mj}}}{mo_{uk_{\mathrm{j}}}} \times mo_{ij} + \sum_{n=1}^{r} \frac{W_{\mathrm{nj}} \times CED_{\mathrm{nj}}}{mo_{uk_{\mathrm{j}}}} \times mo_{ij} \right) \tag{14}$$

U idućem koraku, utjecaj uporabe energije oporabljene iz otpada na proizvodnju sekundarnog (recikliranog) materijala je analiziran na način da je proizvedena oporabljena energija u analiziranom sustavu/scenariju, iz faze energetske proizvodnje, vraćena opet natrag u sustav kako bi zadovoljila energetske potrebe ostalih faza čime se smanjuju energetske potrebe cijelog sustava. Ovo ima izravan utjecaj na vrijednost prvoga faktora u jednadžbi (14), što rezultira u smanjenju ukupne utjelovljene energije proizvedenih materijala. Utjecaj uporabe energije dobivene iz otpada na smanjenje utjelovljene energije materijala je izračunata na način da su izračunane vrijednosti sa i bez uzimanja u obzir proizvodnje energije oporabljene iz otpada međusobno oduzete.

5.5. Socioekonomska analiza

Analiza ekonomskih parametara razmatranih sustava se također bazira na prethodno opisanom i definiranom okviru za praćenje otpadnih, materijalnih i energetskih tokova te nastoji obuhvatiti i socioekonomsku stranu problema otpada, gospodarenja otpadom te njegove oporabe. Korišteni okvir definira model koji je baziran na principu UPR podataka iz LCA baza koji opisuju pojedine tehnologije na principu crne kutije definirajući sve ulazne i izlazne tokove (materijalne, energetske i tokove otpadnih materijala). Povezivanjem ovih tokova iz jedne tehnologije u drugu opisan je cijeli sustav gospodarenja otpadom te svi njegovi tokovi. Ovi tokovi su korišteni kao ulazni podaci u ekonomsku analizu.

Dok su u prethodnim analizama pojedine tehnologije opisane LCI UPR setovima podataka, u ovoj socioekonomskoj analizi su opisani kroz ekonomske funkcije ovisne o ulaznim tokovima otpadnih materijala i otpada koje je potrebno definirati. Većina ekonomskih podataka je preuzeta iz dostupne literature kao CAPEX i OPEX funkcije u ovisnosti od godišnjeg kapaciteta razmatrane tehnologije (za CAPEX) i količine obrađenog otpada (za OPEX). Ove funkcije za tehnologije separacije i zbrinjavanja otpada prikazane su Tablica 3.

Tablica 3. Funkcije ekonomskih veličina za postrojenja za separaciju i odlaganje komunalnog otpada

Tehnologija	CAPEX [€]	OPEX [€/t]	Jed.
Zatvoreno kompostiranje [149]	c = 2000x^(0,8)	o = 2000x^(-0,5)	(15, 16)
Otvoreno kompostiranje [149]	c = 4000x^(0,7)	o = 7000x^(-0,6)	(17, 18)
Odlagalište (x>60000) [149]	c = 3500x^(0,7)	o = 150x^(-0,3)	(19, 20)
Odlagalište (x<60000) [149]	c = 6000x^(0,6)	o = 100x^(-0,3)	(21, 22)
Mehaničko – biološka obrada otpada (MBT) [194]	c = 23844x^(-0,404)	o = 3353,1x^(-0,404)	(23, 24)

c – investicijski trošak [€]
o – trošak pogona i održavanja [€/t]
x – ulazni tok otpada [t/god]

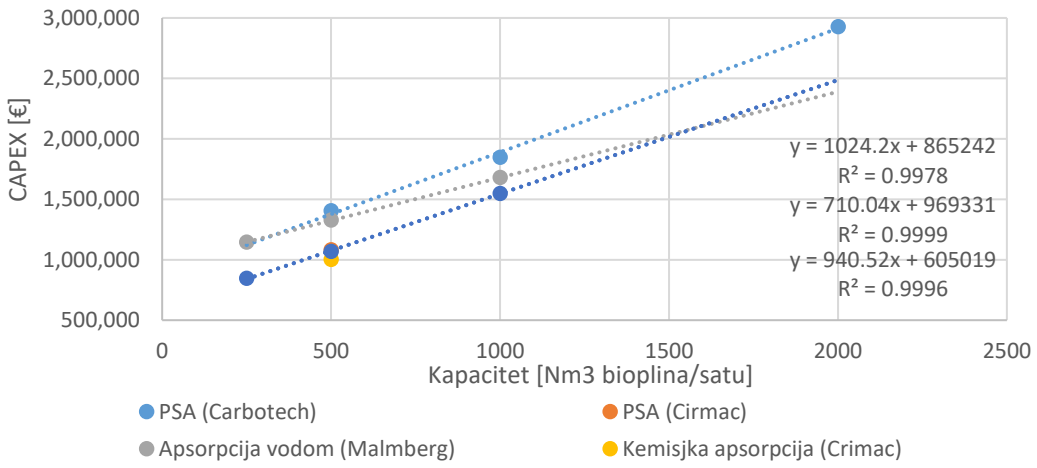
Kako postrojenja za separaciju odvojeno skupljenih frakcija nemaju povezan visok investicijski trošak sa svojom izgradnjom te mogu biti izgrađeni kao distribuirana, ekonomski podaci za ova postrojenja su izraženi kao funkcija ukupnih troškova (t) – jednadžba (25),

$$t = 51515 \times x^{0,73} \ \ [€] \tag{25}$$

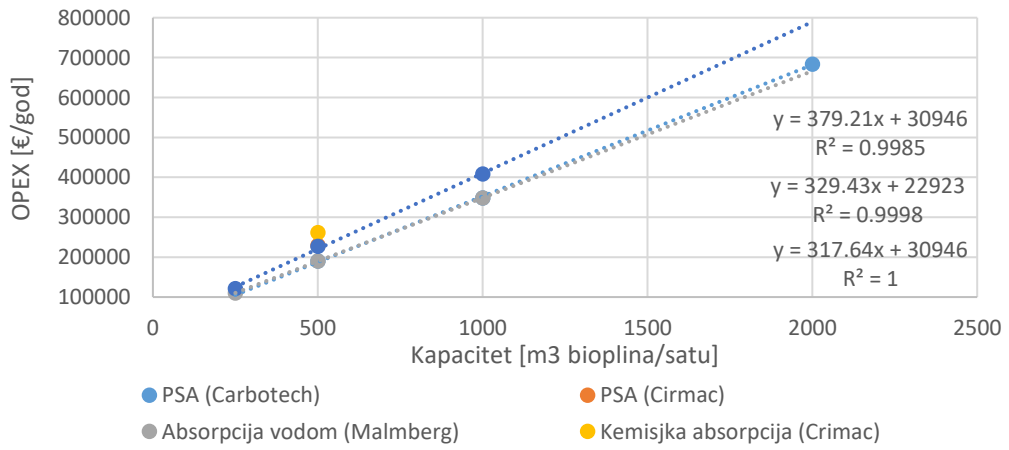
, gdje je x ulazni tok otpada u tonama po danu.

Uz prethodno navedena postrojenja, potrebno je modelirati i postrojenja za oporabu otpada. Tako je ekonomija postrojenja za AD biološke komponente komunalnog otpada modelirana na bazi dostupnih ekonomskih podataka o takvim postrojenjima [149], [194] te podataka o naknadnim transformacijama dobivenog bioplina [195]. Na bazi tih podataka dobivene su funkcije troškova u ovisnosti o kapacitetu postrojenja – jednadžbe (28) i (29).

Odlagalište otpada, čija je ekonomija opisana jednadžbama u Tablica 3, obuhvaća i sustave prikupljanja odlagališnog plina koji se također naknadno transformira u druge energetske vektore. Kako bi se omogućilo ekonomsko modeliranje tehnologija konverzije bioplina, dobivenog iz AD s odlagališta otpada u električnu i toplinsku energiju te biometan i/ili SPP, korišteni su podaci iz dostupne literature. Tako je na bazi podataka iz [195], modeliran ekonomski okvir kogeneracijskog motora s unutarnjim izgaranjem. Ovaj kogeneracijski motor predstavlja značajnu investiciju što potvrđuje i podatak da povećava investiciju za 33,62% u odnosu na postrojene za AD biootpada bez takve energetske transformacije. Prema istome izvoru, troškovi održavanja i pogona procijenjeni su na 5% od investicijskog troška. Što se tiče troškova za pročišćavanje bioplina u biometan, oni su modelirani prema [196] na bazi realnih podataka za pojedine tehnologije te su na bazi ovih podataka izvedene ovisnosti CAPEX-a i OPEX-a prema veličini postrojenja, tj. njegovom kapacitetu - Slika 18 i Slika 19.



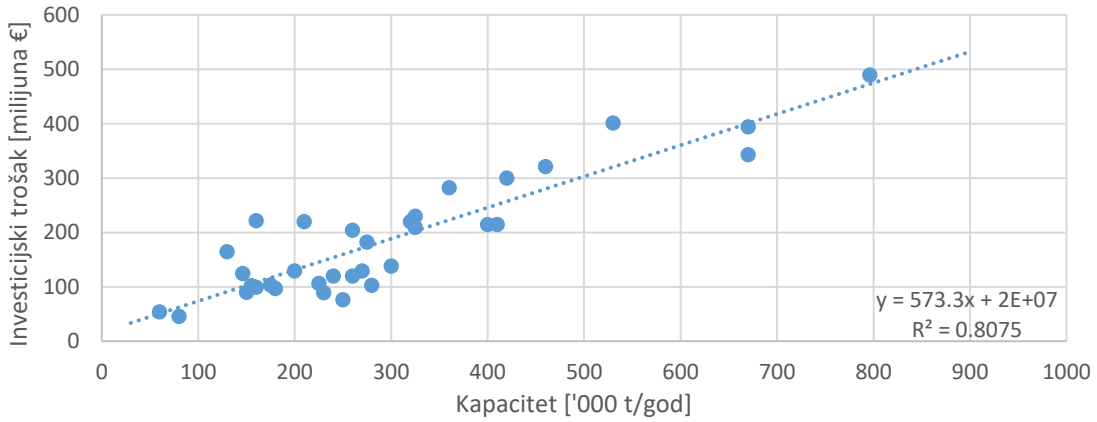
Slika 18. Regresijska analiza CAPEX funkcija za različite tehnologije pročišćavanja bioplina



Slika 19. Regresijska analiza OPEX funkcija za različite tehnologije pročišćavanja bioplina

Što se tiče troškova postrojenja za pripremu SPP, oni su definirani na bazi podataka iz realnih postrojenja [197]. Funkcija ovisnosti kapitalnih troškova o kapacitetu postrojenja je definirana regresijskom analizom – jednadžba (38). Što se tiče troškova održavanja i pogona, oni su procijenjeni na 8% investicijskih troškova godišnje za postrojenja malog kapaciteta te 5% za postrojenja kapaciteta do 130 Nm^3/h SPP-a čime je u obzir uzeta ekonomija veličine. Nakon vrijednosti od 130 Nm^3/h, procijenjeno je povećanje troška od 0,16% po Nm^3 SPP-a.

Ekonomski podaci za postrojenja za TOO izračunani su na temelju opsežnog pregleda dostupnih podataka ([198], [199], [200], [201], [202], [203], [204], [205], [206], [207], [208], [209], [210], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217]) na bazi čega je napravljen skup dostupnih ekonomskih podataka. Nad skupom podataka o investicijskim troškovima provedena je regresijska analiza te je dobivena funkcija kretanja investicijskih troškova u ovisnosti o kapacitetu postrojenja – Slika 20.



Slika 20. Regresijska analiza investicijskih troškova kogeneracijskih postrojenja za TOO

Što se tiče operativnih troškova, oni su prema podacima o pogonskim troškovima [218] i [219] procijenjeni na 4% investicijskog troška za fiksni dio te 19,1 €/t obrađenog otpada za varijabilni dio. Ovi troškovi ne uključuju troškove radne snage koja je na temelju [219] i [220] izračunana na bazi prosječne mjesečne bruto plaće i broja radnika. Za razliku od ostalih postrojenja, pogonski troškovi postrojenja za TOO se uvelike razlikuju u odnosu na količinu termički obrađenog otpada te su stoga troškovi definirani u dva dijela, fiksni i varijabilni dio.

Što se tiče tehnologija za materijalnu oporabu, one nisu modelirane kao dio analiziranog sustava nego su analizirane kao povezane tehnologije putem tržišta sekundarnim sirovinama/materijalima. tj. povezani su samo putem ekonomskih tokova vezanih uz prodane

sekundarne sirovine. Slična situacija je s cementarama koje vrše uslugu materijalne oporabe ostatne frakcije otpada. Ovakvo ekonomsko odvajanje ovih tehnologija od ostatka sustava gospodarenja i oporabe otpada napravljeno je na bazi geografske lokacije pošto pozicija postrojenja za materijalnu oporabu otpadnih materijala kroz njihovo recikliranje nije vezana za područje generiranja otpada te stoga nije niti lokalno bazirana. Ovo isto vrijedi i za cementare. Zbog toga ova postojanja nisu smatrana dijelom lokalnog sustava gospodarenja otpadom. U ovu kategoriju bi se moglo staviti i postrojenje za TOO, ako služi za zbrinjavanje otpada iz više gradova/regija, međutim onda takvo postrojenje nije integrirano u lokalni centralizirani toplinski sustav te predstavlja drugačiju soluciju u odnosu na razmatranu o ovome istraživanju.

Pregled ekonomskih funkcija, izvedenih na prethodno opisan način, dan je Tablica 4.

Tablica 4. Funkcije ekonomskih veličina za postrojenja za energetsku oporabu i energetske transformacije

Technology	**CAPEX [€]**	**OPEX**	**Jed.**
Termička obrada otpada (TOO)	c = 573,3x+2*10^7	o = 51,6x [€]*	(26, 27)
Anaerobna digestija (AD)	c = 26194x^(0.6)	o = 12723x^(-0.6) [€/t]	(28, 29)
Kogeneracijsko postrojenje s bioplinskim motorom	c = $415{,}97y^{0,6}$	o = $90544y^{-0,6}$ [€/m3]	(30, 31)
Postrojenje za pročišćavanje bioplina			
- Apsorpcija vodom	c = 710,04y + 969331	o = 317,64y + 30946 [€]	(32, 33)
- Kemijska adsorpcija	c = 940,52y + 605019	o = 379,21y + 30946 [€]	(34, 35)
- PSA	c = 1024,2y + 865242	o = 329,43y + 22923 [€]	(36, 37)
Postrojenje za pripremu SPP-a	c = 15243z+243028	o = -3,249z^2+167,6z +19442 [€]	(38, 39)

* za postrojenje u punom pogonu
c – investicijski trošak
o – trošak pogona i održavanja
x – ulazna količina otpada [t/god]
y – ulazni tok bioplina [m3/h]
z – izlazni tok SPP-a [m3/h]

Pomoću prethodno navedenih funkcija (Tablica 4) opisana je ekonomska strana pojedinih tehnologija koje čine sustav gospodarenja komunalnom otpadom. Ove funkcije čine

rashodovnu stranu sustava dok prihodovnu čine prihodi od prodaje proizvedenih energenata te sekundarnih sirovina, kao i naknada za zbrinjavanje komunalnog otpada koju plaćaju korisnici sustava tj. građani.

Prihod koji sustav ostvaruje na osnovu proizvedenih energetskih vektora određen je lokalnim aktima za električnu energiju te lokalnim cjenicima za toplinsku energiju u CTS-u, prirodni plin u distribucijskoj plinskoj mreži te cijeni izbjegnute potrošnje dizelskog goriva. Što se tiče inicijalnih troškova zbrinjavanja ostatnog otpada putem cementare, koja predstavlja vanjskog pružatelja usluge zbrinjavanja otpada, uzeta je nulta vrijednost. Ova vrijednost je uzeta zbog nemogućnosti procjene ove cijene, koja je u zapadnim zemljama EU negativna te sustav ostvaruje prihod od prodaje GIO, dok je u jugoistočnim zemljama pozitivna što za sustav predstavlja ekonomski gubitak. Ova vrijednost će još biti analizirana putem analize osjetljivosti sukladno lokalnim prilikama.

Što se tiče prihoda od prodaje separiranih frakcija otpada, on je modeliran prema umnošku izračunanog materijalnog toka (toka otpada) na ulazu u postrojenje za materijalnu oporabu te cijeni na međunarodnim tržištima za tu vrstu sekundarnih sirovina koja je izračunana na bazi indikatora za tržišne cijene za skupljanje materijala za siječanj 2018. – Tablica 5 [221].

Tablica 5. Tržišne cijene sekundarnih sirovina [221]

Materijal	**Cijena [€/t]**
Staklo	10,10
Papir	39,28
Aluminij	1133,44
Čelik	131,86
PET	50,79
HDPE	32,54
Kompost	26,97

Ovakav sustav je financiran od strane korisnika sustava (građana) putem komunalnog poduzeća grada ili općine. Kako ovaj sustav pruža javnu uslugu skupljanja i gospodarenja komunalnim otpadom, a ne kako bi ostvario profit, ekonomska analiza prati minimalan potreban trošak sustava kojega moraju pokriti njegovi korisnici kako bi izjednačio godišnji tok novca s nulom – jednadžba (40).

$$\sum_{i=1}^{n} Cc_i + \sum_{i=1}^{n} Co_i - \sum_{j=1}^{m} (M_j \times c_j) - \sum_{k=1}^{o} (E_k \times c_k) - T = 0 \quad (40)$$

, gdje su

Cc – ukupni godišnji trošak prouzročen kapitalnim troškom određene tehnologije *i*

Co – ukupni godišnji trošak pogona i održavanja određene tehnologije *i*

M – tok otpadnog materijala na ulazu u vanjsku tehnologiju *j*

E – proizveden energetski tok iz tehnologije *k*

T – trošak sustava koji podmiruju njegovi korisnici

c_j – otkupna cijena sekundarne sirovine *j*

c_k – otkupna cijena proizvedenog energetskog vektora iz tehnologije *k*

Time su svi prihodi (prihodi od proizvoda poput proizvedenih energetskih vektora, sekundarnih materijala i komposta) i rashodi (poput otplata kredita i troškova pogona i održavanja) takvog sustava uzeti u obzir te sustav posluje na pozitivnoj nuli. Smanjenjem ukupnog troška sustava dolazi do smanjenja iznosa naknade za zbrinjavanje otpada za građane, koju plaćaju po količini odloženog miješanog komunalnog otpada, što čini i socijalnu komponentu ove analize koja je važna ukoliko želimo privoliti građane na sudjelovanje u radu komunalnog sustava. Ovakav način vođenja poslovanja postrojenja/sustava koji pružaju javnu uslugu, na način da im se zabranjuje generiranje profita, je već reguliran u nekim državama, lokalnim ili nacionalnim legislativnim odrednicama. Na primjer, u Danskoj je taj način vođenja ovakvih postrojenja i sustava striktno reguliran na nacionalnom nivou.

5.6. Multikriterijsko rangiranje

Kod odabira analiza i modeliranja pokazatelja u ovome se istraživanju vodilo računa o tome da se olakša donošenje odluke kreatorima politika. Ovo se postiglo na način da dobiveni rezultati koreliraju s većim brojem specifičnih (jednodimenzijskih) pokazatelja. Tako analiza utjecaja kroz korištenje CED analize istovremeno pokazuje opterećenje na okoliš kroz iskorištavanje prirodnih resursa, antropogeni utjecaj na klimu kroz mjerenje ukupne količine ugljičnog dioksida (CO_2), metana (CH_4), dušičnog oksida (N_2O), fluorovodičnih ugljikovodika (HFC), perfluorougljika (PFC) i sumporovih heksafluorida (SF_6), utjecaj emisija širokog spektra ostalih polutanata u zrak, površinske vode, podzemne vode i tlo, kao i utjecaj na ljudsko zdravlje te

kvalitetu eko-sustava – što je prikazano na Slika 16. Dok CED analiza predstavlja dobar pokazatelj održivosti sustava gospodarenja i oporabe otpada s aspekta okoliša, kao i ovisnosti o uvozu sirovina, ona ne govori puno o ulozi oporabe otpada u kružnom gospodarstvu te cijelom kontekstu „zatvaranja petlje“ na kojem se zasniva čitava nova europska legislativa. Analiza održivosti kroz analizu utjelovljene energije zatvara upravo tu prazninu te pokazuje utjecaj „zatvaranja petlje“ unutar istog sustava na održivost proizvoda. Osim toga ovaj pristup analizira stupanj ponovne uporabe proizvedenih sekundarnih materijalnih i energetskih sirovina kao i stupanj industrijske simbioze što je također jedan od naglašenih ciljeva europske legislative u ovome području. S druge strane, iako EU nastoji potaknuti članice na prelazak prema održivijim sustavima gospodarenja otpadom, ekonomska strana problema još uvijek predstavlja najznačajniji aspekt za lokalne i područne (regionalne) samouprave, pogotovo jer uz sebe veže i pitanje socijalne prihvatljivosti koje je najznačajnije za donosioce odluka, koji su izabrani od strane građana koji su u isto vrijeme i korisnici i financijeri razmatranog sustava. Stoga, kreatori politika moraju procijeniti sve spomenute faktore prilikom donošenja odluka u kojem će smjeru krenuti, ili nastaviti, razvoj sustava gospodarenja i oporabe komunalnog otpada.

Iako se navedenim pristupom smanjio broj potrebnih pokazatelja za donošenje odluke te se iz prethodno prezentiranih rezultata može zaključiti koji scenariji su pogodniji sa stajališta EU, ali i sa stajališta jedinica lokalne i područne samouprave, analizirani scenariji su dodatno rangirani kroz pristup multikriterijskog donošenja odluka (*engl. multi criteria decision making - MCDM*) kako bi se olakšalo jednoznačno donošenje odluke. U ovome istraživanju, za donošenje konačne odluke, korištena je PROMETHEE II metoda kao i GAIA pristup prezentiranju dobivenih rezultata.

5.6.1. MCDM pristup

Tijekom proteklih desetljeća metodologije planiranja su se promijenile iz jednostavnog sustava, koji je imao zadaću zadovoljiti samo jedan cilj, u složeniji sustav, zbog uključivanja više mjerila, dionika i ciljeva koji se međusobno (djelomično) isključuju. Tradicionalno odlučivanje, koje se u osnovi bavi maksimiziranjem ili minimizacijom jedne određene veličine, zamjenjuje način planiranja koji obuhvaća višestruke ciljeve, definicije i kriterije koji otežavaju donošenje odluka. Odgovarajući sustav planiranja s obzirom na potrebne ekološke, političke, sociološke i ekonomske aspekte bitan je za ostvarivanje vizije održivog razvoja. Kako bi se riješili takvi

složeni problemi, multikriterijsko donošenje odluka (MCDM) se pokazalo kao jedan od boljih alata za učinkovito planiranje.

Provođenje analiza putem MCDC je u osnovi poteklo iz operacijskih istraživanja koja uključuju širok raspon metodologija, uz racionalne temelje u drugim disciplinama [222]. MCDM tehnike su pronašle široku primjenu u javnom i privatnom sektoru te se upotrebljavaju za donošenje odluka u širokom spektru aktivnosti - upravljanju resursima i dizajniranju sustava u poljoprivredi, imigraciji, obrazovanju, transportu, investiranju, okolišu, obrani, zdravstvenoj zaštiti, energetici itd. [223], [224], [225], [226], [227], [228], [229], [230].

S porastom složenosti sustava MCDM dobiva na važnosti. MCDM se smatra evaluacijskom strukturom vrednovanja za rješavanje ekoloških, socioekonomskih, tehničkih i institucionalnih prepreka uključenih u procese planiranja [231]. Ona omogućava donositeljima odluka obraćanje pažnje na sve dostupne kriterije i donošenje odgovarajućih odluka prema prioritetu. Budući da je optimalna struktura sustava upravljana višestrukim kriterijima (dimenzijama), dobar donositelj odluka mora donijeti odluku o tome po kojem će kriteriju napraviti kompromis i/ili koji je kriterij važniji od drugih. Tako, MCDM pomaže donositelju odluka omogućavajući mu rangiranje kriterija na temelju njihove važnosti s ciljem dostizanja optimalnog rješenja [232].

5.6.1.1. PROMETHEE metoda

Obitelj PROMETHEE (*engl. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*) iz grupe MCDM metoda predstavlja metode „višeg ranga“ (*engl. outranking methods*) te uključuje PROMETHEE I metodu za djelomično rangiranje alternativa i PROMETHEE II za potpuno rangiranje alternativnih scenarija. Tijekom godina su razvijene još neke verzije ove metode (PROMETHEE III – VI) [233], [234].

Prednost PROMETHEE pristupa je u tome što ne zahtijeva pretpostavku da su kriteriji razmjerni, dok je glavni nedostatak u tome što zahtijeva dodjelu težinskih faktora za kriterije, ali ne pruža jasnu metodu za njihovo dodjeljivanje. PROMETHEE pristup se već desetljećima koristi u sustavima upravljanja okolišem, hidrologiji i upravljanju vodama, poslovnog i financijskog upravljanja, kemije, logistici i transportu, proizvodnji i montaži, energetici i poljoprivredi, itd.

Kako bi se pojasnio pristup rangiranju kroz PROMETHEE metodu, višekriterijski problem, u kojem se zahtjeva maksimizacija kriterija, prikazan je relacijom:

$$Max\ (f(a), \dots, f_k(a))|_{a \in A} \tag{41}$$

, gdje je *A* konačni skup aktivnosti, a $f(a), \dots, f_k(a)$ su zadani kriteriji.

Da bi se odgovorilo na zadani problem, potrebno je prvo formirati relaciju preferencije (*engl. outranking relation*) kojom se, za svaki od kriterija, izražavaju preferencije između dviju alternativa na temelju razlike vrijednosti. Konstruirana relacija se upotrebljava na način da se za svaku alternativu izračunavaju ulazni i izlazni tokovi.

Ako se funkcijom *f* prikaže jedan od kriterija (atributa) koji se koristi za usporedbu alternativnih scenarija:

$$f\colon\ A\ \rightarrow R \tag{42}$$

, rezultat usporedbe dviju alternativa *a* i *b* (za koje vrijedi $a,b \in A$) se izražava u obliku preferencije te se preferencijskom funkcijom *P* (jednadžba (43)) izražava intenzitet preferencije između dvaju predmetnih alternativa.

$$P\colon\ A\ \times A \rightarrow\ [0,1] \tag{43}$$

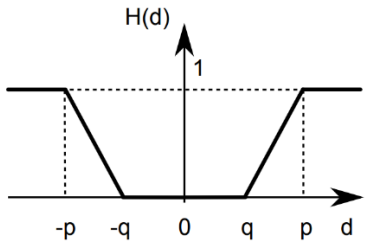
Iznos preferencije $P(a,b)$ označava intenzitet preferencije alternative *a* nad alternativom *b*, gdje 0 označava indiferenciju između alternativa, dok 1 označava strogu preferenciju alternative *a* nad alternativom *b*. Funkcija preferencije $P(a,b)$, pridružena određenom kriteriju je razlika kriterijskih funkcija alternativa $H(d)$ – jednadžba (44) [235], [236].

$$P(a,b)\ =\ P\big(f(a) - f(b)\big)\ =\ H(d) \tag{44}$$

Za predmetno rangiranje rezultata, korištena je funkcija kriterija s linearnom preferencijom i zadanim područjem indiferencije - jednadžba (45).

$$H(d) = \begin{cases} 0, |\mathrm{d}| \leq \mathrm{q} \\ \dfrac{|\mathrm{d}| - \mathrm{q}}{\mathrm{p} - \mathrm{q}}, \mathrm{q} < \mathrm{d} \leq \mathrm{p} \\ 1, \mathrm{p} < |\mathrm{d}| \end{cases} \tag{45}$$

Kod ove funkcije kriterija potrebno je definirati dva praga, prag indiferentnosti (q) i prag stroge preferencije (p), između kojih funkcija preferencija linearno raste – Slika 21.



Slika 21. Funkcija kriterija s linearnom preferencijom i zadanim područjem indiferencije

Po definiranju funkcije preferencije P_i, potrebno je odrediti i težinski faktor w_i za svaki kriterij $f_i(i=1, \ldots, k)$ koji predstavlja mjeru relativne važnosti kriterija f_i. Na osnovi prethodno definirane funkcije P_i i vrijednosti w_i definira se višekriterijski indeks preferencije $\Pi(a, b)$ koji predstavlja intenzitet preferencije aktivnosti (u ovome slučaju alternativnog scenarija) a u odnosu na aktivnost b, uzimajući u obzir sve kriterije – jednadžba (46).

$$\Pi(a,b)\ \frac{\sum_{i=1}^{k} w_i\, P_i(a,b)}{\sum_{i=1}^{k} w_i} \tag{46}$$

Vrijednost indeksa preferencije kreće se između 0 i 1, gdje približavanje vrijednosti 0 označava slabu preferenciju, dok približavanje jedinici označava jaku preferenciju aktivnosti a nad aktivnošću b za sve razmatrane kriterije. Prema tome, dvije aktivnosti su povezane vrijednostima preferencija $\Pi(a,b)$ i $\Pi(b,a)$ te je stoga svaka aktivnost a usmjerena prema n-1 alternativnih aktivnosti koje su dio skupa A.

Na temelju prethodno navedenog, definiraju se izlazni (Φ^+) i ulazni (Φ^-) tokovi za svaku aktivnost (jednadžbe (47) i (48)). Izlazni tokovi pokazuju dominaciju predmetne aktivnosti (a) nad drugim aktivnostima dok ulazni tokovi pokazuju dominaciju drugih, alternativnih aktivnosti nad predmetnom aktivnošću.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x\in A}\Pi(\mathrm{a},\mathrm{x}) \tag{47}$$

$$\Phi^{-}(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \in A} \Pi(\mathrm{a,x}) \tag{48}$$

Izračunani ulazni i izlazni tokovi koriste se za rangiranje aktivnosti (scenarija) na način da iznos $\Phi^{+}(a)$ toka određuje dominaciju aktivnosti nad ostalim aktivnostima unutar razmatranog skupa *A*, dok tok $\Phi^{-}(a)$ određuje stupanj dominacije ostalih aktivnosti nad razmatranom aktivnošću. Na ovaj način se dobivaju informacije o međusobnom rangiranju analiziranih scenarija, dok se ukupni poredak dobiva kroz potpuno rangiranje koristeći jednadžbu (49). Rezultat ove jednadžbe služi kao direktni pokazatelj ranga razmatranih scenarija po principu „veći rezultat – bolja alternativa“.

$$\Phi(a) = \Phi^{+}(a) - \Phi^{-}(a) \tag{49}$$

5.6.1.2. GAIA metoda

Pošto postoji mogućnost postojanja alternativnih scenarija koji se ne mogu međusobno jednoznačno usporediti kao i mogućnost da prilikom potpunog rangiranja dođe do vrlo malih razlika u dobivenim rezultatima, što se može promatrati kao nepouzdanost dobivenih rezultata, moguće je provesti grafičku (geometrijsku) analizu ponašanja razmatranih alternativa prema pojedinačnim kriterijima. U ovome pomaže GAIA (*engl. Geometrical Analysis for Interactive Aid*) pristup prezentiranju rezultata dobivenih PROMETHEE metodom koje se zasniva na svođenju višedimenzijskog problema poput višekriterijske analize, u kojoj svaki kriterij predstavlja jednu dimenziju (os, tj. vektor), na dvodimenzijski prikaz. Iako prilikom ovakve transformacije dolazi do određenog gubitka informacija, geometrijski prikaz daje novi pogled na problem koji donositeljima odluke mogu biti od velike koristi. Težinske vrijednosti dane pojedinim kriterijima se također mogu prikazati u geometrijskom prikazu pomoću „vektora odluke“ koji je usmjeren u smjeru optimalnih alternativa [237].

U ovome istraživanju, tj. u prethodnom koracima, je razvojem novih metodologija i pristupa razmatranim problemima koje obuhvaćaju široki spektar analiza u tri jednovrijednosna indikatora, broj dimenzija smanjen na tri zbog čega je i gubitak informacija u ovome dijelu analize značajno smanjen.

Predmetne PROMETEE i GAIA analize provedene su nad rezultatima prethodno definiranih analiza pomoću Visual PROMETHEE [238] računalnog paketa.

5.7. Definiranje studije slučaja i scenarija

5.7.1. Definiranje studije slučaja i zavisnih ulaznih veličina

Ideja iznesena na početku ovoga rada je poduprta studijom slučaja. Na analiziranom slučaju primijenjena je prethodno opisana metodologija koja je dodatno proširena lokalno ovisnim varijablama. Analizirani slučaj temelji se na primjeru glavnog grada novije članice EU s 790.017 stanovnika (1.232 stanovnika po četvornom kilometru), od čega je 99% stanovništva pokriveno sustavom skupljanja komunalnog otpada [239], [240]. Analizirani grad ima nisku razinu odvojenog prikupljanja otpada od 13,5% i predstavlja situaciju u novijim državama članicama EU čiji sustavi gospodarenja komunalnim otpadom ne ispunjavaju ciljeve europske legislative.

Promjene u sustavu gospodarenja otpadom su modelirane kroz tri alternativna sustava (scenarija) te tri vremenska okvira. Razmatrane tehnologije obuhvaćaju glavne, komercijalno dostupne i najviše korištene tehnologije za obradu komunalnog otpada u EU: sekundarnu separaciju otpada (MBO za miješani komunalni otpad te tehnologije obrade (separiranja) odvojeno skupljenih otpadnih materijala); biološku obradu biootpada (aerobnu (otvoreno kompostiranje) i anaerobnu (AD); termičku obradu otpada (izravno izgaranje); odlagalište otpada (sa sustavom skupljanja odlagališnih plinova); kao i tehnologije transformacije energije kao što su motor s unutarnjim izgaranjem (za transformaciju bioplina i odlagališnog plina) te postrojenja za čišćenje bioplina (za proizvodnju biometana) i njegovu kompresiju (pripremu SPP-a). Što se tiče tehnologija, ovo istraživanje je ograničeno na ekološki i termodinamički dokazane alternative (npr. razmatrala se samo kogeneracijska proizvodnja, a ne monogeneracija, kao i odlaganje otpada isključivo sa sustavom skupljanja odlagališnih plinova). Također, u obzir je uzeta i mogućnost zbrinjavanja ostatnog otpada u cementarama gdje služi kao zamjena dijela goriva.

Količine generiranog otpada kao i njegova svojstva u vremenskom okviru danas su modelirani na temelju lokalnog izvještaja o komunalnom otpadu iz 2014. godine [241]. Budući da se u planiranju sustava gospodarenja komunalnim otpadom moraju uzeti u obzir vremenski ovisne promjene u svojstvima i količinama otpada, kao i zakonske smjernice, putem provođenja uzastopnih analiza za analizirane slučajeve pokrivene su prognozirane promjene u količinama skupljenog otpada kao i njegovom sastavu. Ove sekvencijalne analize uzimaju u obzir granice

postavljene legislativnim ciljevima EU, odnosno u njima su ispunjeni ciljevi za 2020. i 2030. godinu. Istovremeno sastav i količine otpada su prilagođeni te prate i vremenske socioekonomske i tehnološke promjene. Razrađeni pristup obuhvaća širok raspon mogućih situacija unutar sustava gospodarenja komunalnim otpadom (postojećih i planiranih) po pitanju primijenjenih tehnologija (unutar prethodno navedenih ograničenja analize) i stupnja ispunjavanja legislativnih ciljeva EU.

Za modeliranje sustava lokalni i europski UPR i CED faktori su korišteni i prilagođeni kako bi se uskladili sastavi lokalnog otpada i rezultirajuća donja ogrjevna vrijednost, proizvodnja bioplina i odlagališnog plina, kao i udio metana. Podaci o sastavu otpada također su korišteni za prilagodbu UPR podataka za tehnologije sortiranja kako bi izlazni podaci sortiranog otpada odgovarali ulaznom sastavu.

U slučaju spaljivanja otpada, za izračun ukupne ogrjevne vrijednosti korišteni su podaci o donjoj ogrjevnoj vrijednosti miješanog otpada, mulja iz procesa AD, ostatnog otpada te goriva iz otpada (GIO). Ova vrijednost izračunana je korištenjem stvarnih podataka o generiranju i prikupljanju otpada [241]. Podaci koji nisu bili praćeni izvješćima izračunani su na temelju [176] za udio aluminija i čelika u odvojeno skupljenom metalnom otpadu te na bazi UPR podataka postrojenja za sortiranje plastike za modeliranje udjela specifičnih plastičnih frakcija (u ovome slučaju polietilentetraftalat (PET) i polietilen (PE)) u odvojeno skupljenom plastičnom otpadu. Buduće količine otpada, sastav i odgovarajući ogrjevna vrijednost prognozirani su pomoću LCA-IWM prognostičkog modela [175] te prethodno opisane metodologije. Prognoza je izvršena korištenjem graničnih uvjeta utvrđenih Direktivom o odlagalištima otpada, Okvirnom direktivom o otpadu za razdoblje do 2020. godine i Paketom kružnog gospodarstva za razdoblje do 2030. godine. Zbog toga svi definirani scenariji ispunjavaju sve zahtjeve koji su postavljeni legislativom EU po pitanju odvojenog prikupljanje otpada, oporabu otpada, recikliranje i smanjenja odlaganja. Ovime je opisana i vremenska dimenzija. Stvarne i prognozirane količine komunalnog otpada prikazane su u Tablica 6., dok je dobiveni sastav miješanog komunalnog otpada prikazan Tablica 7.

Tablica 6. Aktualni i prognozirani podaci o količinama skupljenog komunalnog otpada

	Danas [241]		**2020**		**2030**	
	Količina [t]	Udio [%]	Količina [t]	Udio [%]	Količina [t]	Udio [%]
Staklo	817,52	0,30%	5500,00	1,72%	9.300,00	2,23%
Papir	1447,00	0,54%	59.700,00	18,63%	82.200,00	19,71%
Metali	500,14	0,19%	1.700,00	0,53%	2.400,00	0,58%
- Al [176]	52,93	0,02%	179,90	0,06%	253,97	0,06%
- Fe [176]	447,21	0,17%	1.520,10	0,47%	2.146,03	0,51%
Plastika	1.695,41	0,63%	38.100,00	11,89%	66.000,00	15,82%
- Polietilentetrafalat*	1.314,27	0,49%	29.534,88	9,22%	51.162,79	12,27%
- Polietilen*	381,14	0,14%	8.565,12	2,67%	14.837,21	3,56%
Biootpad	31.707,41	11,80%	107.200,00	33,45%	133.600,00	32,03%
- Kuhinjski	3.772,79	1,40%	78.570,07	24,51%	104.792,40	25,12%
- Organski/vrtni	27.934,62	10,39%	28.629,93	8,93%	28.807,61	6,91%
Miješani otpad	232.587,16	86,54%	108.300,00	33,79%	123.600,00	29,63%

*izračun baziran na UPR podacima tehnologije za sortiranja plastike

Veliko smanjenje prikupljenih količina miješanog otpada do 2020., u usporedbi s današnjom količinom, rezultat je velikog povećanja u primarnoj separaciji u kratkom vremenu (kako bi se postigli legislativni ciljevi EU). Do povećanja ukupne proizvodnje otpada u razdoblju od 2020. do 2030. godine dolazi zbog većeg prirasta u generiranju sveukupnog komunalnog otpada u odnosu na utjecaj koji donosi daljnje povećanje u primarnoj separaciji.

Tablica 7. Aktualni i prognozirani podaci o sastavu skupljenog miješanog komunalnog otpada

	Danas*	**2020**	**2030**
Papir [%]	27,1	18,4	22,2
Staklo [%]	3,6	5,1	4,1
Metali [%]	1,1	1,5	1,1
Plastika [%]	26,4	35,3	28,8
Biootpad [%]	26,5	12,1	13,7
Vrtni otpad [%]	5,1	2,3	2,5
Ostalo [%]	10,2	25,4	27,7

*Lokalni plan gospodarenja otpadom [242]

Donja ogrjevna vrijednost otpada, potencijal proizvodnje bioplina te odlagališnog plina kao i potencijal generiranja biometana u generiranom plinu, za analizirana razdoblja prikazani su Tablica 8.

Tablica 8. Energetska svojstva

	Danas	**2020**	**2030**
Donja ogrjevna vrijednost miješanog otpada [MJ/kg]	11,07	12,53	11,80
Potencijal generiranja bioplina (AD) [m3/t]*	166,82	170,89	172,03
Potencijal generiranja biometana (AD) [m3/t]*	105,25	108,91	110,06
Potencijal generiranja odlagališnog plina [m3/t]**	115,54	83,31	94,21
Potencijal generiranja biometana (odlagalište) [m3/t]**	71,96	51,82	58,37

* za biogenu frakciju
** za 30 godišnje skupljanje odlagališnog plina

Donja ogrjevna vrijednost je izračunana korištenjem Mendelieve jednadžbe (jednadžba (1)), kemijskog sastava pojedinih frakcija otpada (Tablica 2) te podataka o sastavu miješanog otpada (Tablica 7), dok je proizvodnja bioplina iz postrojenja za AD izračunata na bazi podataka iz literature [243]. Na osnovu podataka iz navedene literature (Tablica 9) te prema udjelu dvaju praćenih frakcija biootpada (kuhinjski otpad i vrtni otpad (Tablica 6)) te njihovim karakteristikama, izračunan je potencijal generiranja metana L_0 – jednadžba (40). Na osnovi izračunatog L_0 za bioplinsko postrojenje te podataka o sastavu miješanog otpada (Tablica 7) izračunat je L_0 za odlagalište miješanog otpada (jednadžba (51)) na osnovu kojeg je korištenjem LandGEM modela izračunana i proizvodnja odlagališnog plina, kao i vremenska raspodjela proizvodnje, za razdoblje od 30 godina.

$$L_{0,AD} = \left(\frac{P_{bp,k}}{S_{m,k}} \times \frac{x_k}{x_k + x_v}\right) + \left(\frac{P_{bp,v}}{S_{m,v}} \times \frac{x_v}{x_k + x_v}\right) \quad [\mathrm{m}^3/\mathrm{t}] \tag{50}$$

$$L_{0,odl} = L_{0,AD} \times x_{bio} \quad [\mathrm{m}^3/\mathrm{t}] \tag{51}$$

, gdje su

$L_{0,AD}$ – potencijal generiranja biometana kroz AD biootpada [m^3/t]
$P_{bp,k}$ – prinos bioplina za kuhinjski otpad [m^3/t]
$P_{bp,v}$ – prinos bioplina za vrtni otpad [m^3/t]
$S_{m,k}$ – sadržaj metana u bioplinu, kuhinjski otpad [%]
$S_{m,v}$ – sadržaj metana u bioplinu, vrtni otpad [%]
x_k – udio kuhinjskog otpada [%]
x_v – udio vrtnog otpada [%]

$L_{0,odl}$ – potencijal generiranja biometana kroz odlagališni plin [m^3/t]

x_{bio} – udio biootpada u otpadu koji se odlaže na odlagalište (%)

Tablica 9. Karakteristike otpada koje su najčešće korištene kao supstrati za AD [243]

	Sadržaj ST [%]	**Sadržaj oST [%]**	**Prinos bioplina [m^3/t oST]**	**Prinos bioplina [m^3/t svježeg supstrata]**	**Sadržaj metana u bioplinu [%]**
Kuhinjski otpad (otpaci od hrane)	27	92	720	179	65
Vrtni i ostali organski otpad	40	80	454	145	60
Uljni separatori (prije izdvajanja vode)	36	69	1200	298	61

5.7.2. Definiranje scenarija

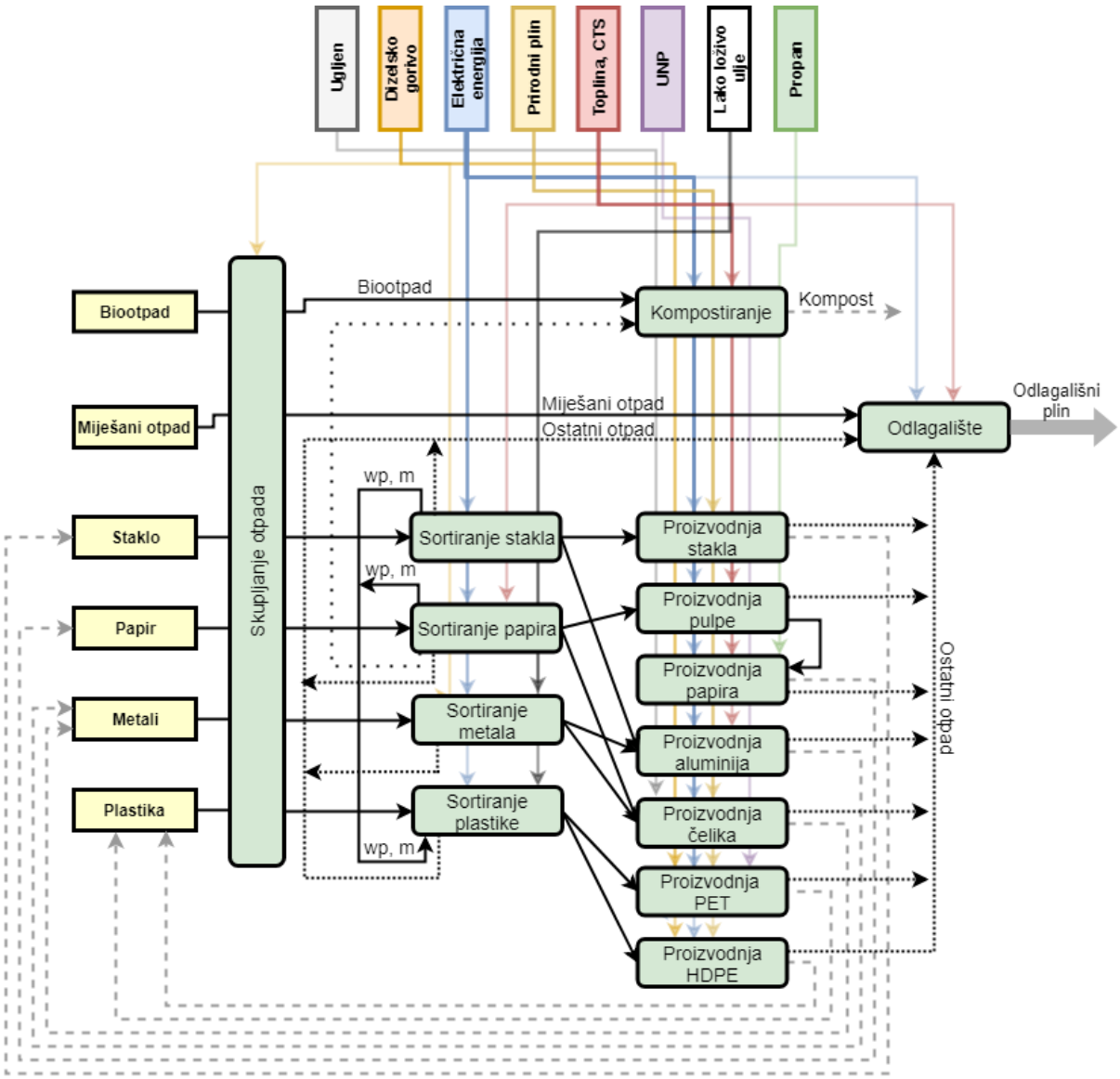
Kako bi se dao odgovor na postavljena pitanja, obavljena je scenarijska analiza nad definiranom studijom slučaja. Analizirani scenariji su: prvi scenarij koji opisuje postojeći lokalni sustav gospodarenja otpadom (scenarij *Postojeći sustav*), drugi opisuje lokalni planirani razvoj sustava prama planu gospodarenja otpadom [242] (scenarij *Plan*), treći opisuje potencijal materijalne oporabe (scenarij *Materijalna oporaba*) te četvrti koji opisuje potencijal energetske oporabe korištenjem tehnologija prepoznatim lokalom legislativom (scenarij *Energetska oporaba*). Analizirani scenariji se sastoje od istih tehnologija za recikliranje svih razmatranih vrsta otpadnih materijala, koje su više ili manje korištene s izuzetkom kompostiranja koje je u pojedinim scenarijima zamijenjeno AD-om biorazgradive komponente komunalnog otpada. Što se tiče tehnologija separacije otpada, scenariji se razlikuju u prisustvu postrojenja za MBO miješanog otpada. Analizirane tehnologije energetske oporabe obuhvaćaju odlaganje otpada sa sustavom sakupljanja odlagališnih plinova (u scenariju *Postojeći sustav*), spaljivanje nerazvrstanog mješovitog otpada u kogeneracijskom postrojenju za TOO (u scenariju *Plan*), termičku obradu ostatnog otpada u cementari (u scenariju *Materijalna oporaba*) te spaljivanje GIO iz postrojenja za MBO u kogeneracijskom postrojenju za TOO, kao i AD primarno i sekundarno odvojenog biootpada (u scenariju *Energetska oporaba*). Nadalje, analizirane su i tri varijante u vezi s mogućom naknadnom transformacijom i korištenjem pojedinih energetskih vektora (bioplina i odlagališnog plina) – transformacija u kogeneracijskom postrojenju s

bioplinskim motorom za proizvodnju toplinske i električne energije, transformacija (pročišćavanje) bioplina u biometan s injektiranjem proizvedenog biometana u plinsku mrežu te transformacija proizvedenog biometana u SPP za pogon motornih vozila.

5.7.2.1. Scenarij: Postojeći sustav

Scenarij Postojeći sustav opisuje trenutačno stanje lokalnog sustava gospodarenja otpadom kao i njegove oporabe te je prikazan Slika 22.

Slika 21 – Slika *25* prikazuju pojedine scenarije te sve unutarnje tokove otpada (crne linije) i vanjske tokove energije koji vizualiziraju potrošnju energije za svaku tehnologiju (linije u boji). Proizvodnja materijala označena je sivim crtkanim linijama koje povezuju proizvodnu tehnologiju i odgovarajuće otpadne tokove, pošto će „zatvaranjem petlje“ proizvedeni materijali ponovno ući u sustav gospodarenja otpadom. Proizvodnja energetskih vektora označena je kao crtkana linija koja povezuje tehnologiju koja proizvodi predmetni energetski vektor i odgovarajući energent (pošto proizvodnja energije iz otpada u konačnici smanjuje potrošnju primarnog energetskog vektora), proizvodnja bioplina označava se kao siva strjelica jer bioplin nije klasificiran kao finalni energetski vektor te ga treba dodatno transformirati prije finalne potrošnje.

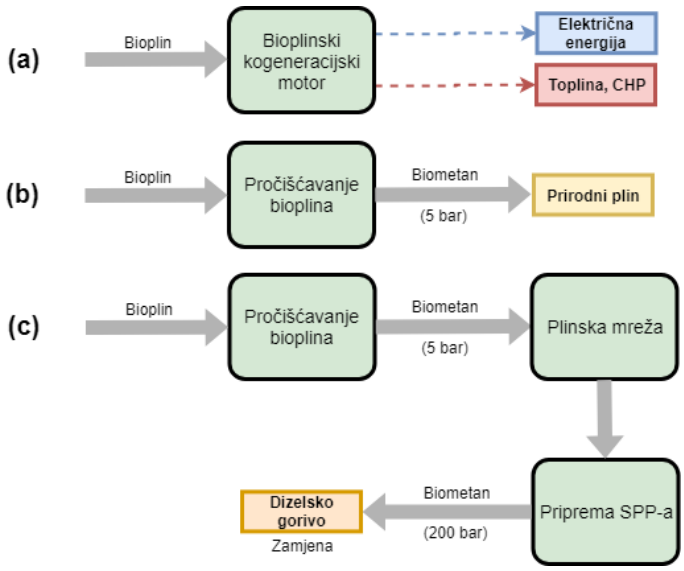


Slika 22. Scenarij: Postojeći sustav

Skupljanje i transport otpada nisu modelirani isključivo na bazi LCI UPR podataka za pojedine aktivnosti zbog potrebe za izražavanjem energetske potrošnje na osnovi jedinice mase (kg), a ne transportnih jedinica za prijevoz tereta (t x km), što zahtjeva razvijeni model. Zbog toga je potrošnja goriva kamiona za skupljanje otpada modelirana prema dostupnim podacima o potrošnji dizelskog goriva u sustavu skupljanja komunalnog otpada u razmatranoj zemlji [244] (0,00364 kg dizela po toni otpada), podacima o transportnim aktivnostima specifičnim za kamione za skupljanje i transport otpada (bruto (ukupne) mase 28 i 40 tona), transportnih udaljenosti te podataka o potrošnji kamiona u ovisnosti o napunjenosti koji su preuzeti iz literature [181].

Udaljenosti za transport otpada nisu posebno modelirane, jer većina objekata razmatranih sustava za gospodarenje otpadom nije još izgrađena ,a planirana su i premještanja postojećih postrojenja. Iz tog razloga, udaljenosti prijevoza otpada modelirane su kroz srednju vrijednost od 20 km za transport otpada unutar grada i 250 km za međugradski prijevoz. Međugradski prijevoz se uglavnom koristi za transport GIO u cementaru te za transport sortiranog recikliranja u postrojenja za materijalnu oporabu za koja je pretpostavljeno da se nalaze izvan grada. Održavanje kamiona modelirano je prema podacima za održavanje 28-tonskih kamiona za skupljanje otpada i kamiona bruto mase 40 tona za transport otpada. UPR podaci su izraženi na temelju jedinice mase koristeći podatke navedene u LCA bazama podataka o aktivnostima (izvornih UPR podataka izraženih u transportnim jedinicama za prijevoz tereta, životnog vijeka vozila od 540.000 km te lokalno ovisnih podataka o skupljanu/prijevozu otpada).

Shema na Slika 22 pokazuje da je scenarij *Postojeći sustav* temeljen na odlaganju otpada te se europski ciljevi po pitanju gospodarenja otpadom zadovoljavaju isključivo temeljem primarne separacije otpada. Energetska oporaba je prisutna samo u obliku skupljanja odlagališnog plina koji se transformira u druge energetske vektore kao što je prikazano na Slika 23.



Slika 23. Analizirane varijante po pitanju korištenja bioplina

Proizvedeni bioplin može se koristiti u kogeneracijskom motoru s unutarnjim izgaranjem (gdje se transformira u električnu i toplinsku energiju, čime se smanjuje potrošnja energetskih vektora koji odgovaraju energetskom miksu dobivenom iz lokalne električne i toplinske (CTS) mreže), može se pročistiti u biometan i ubrizgati u lokalnu plinsku mrežu (čime se smanjuje potrošnje

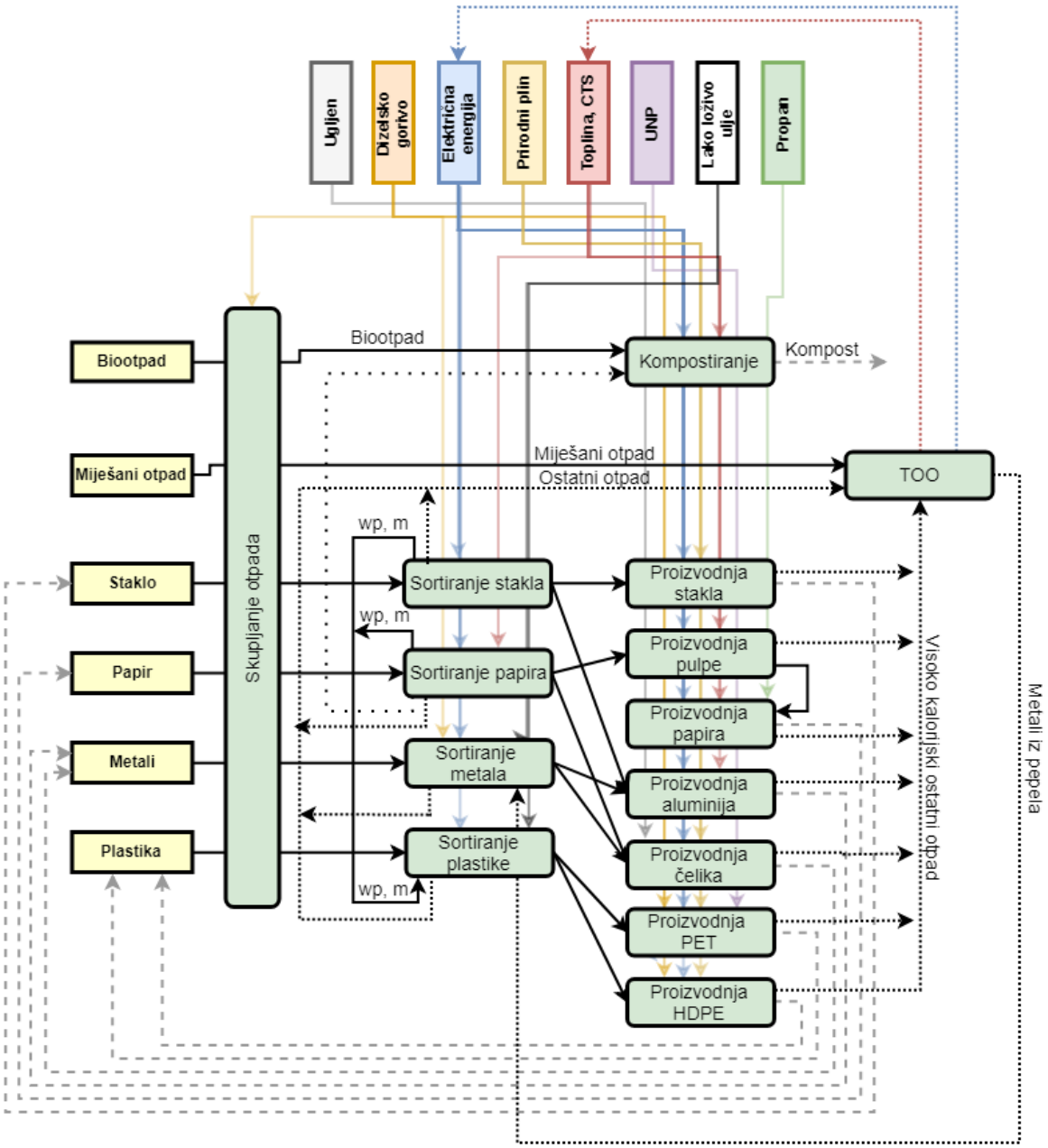
prirodnog plina iz lokalne mreže), kao i naknadno komprimiran u SPP za uporabu u vozilima za prikupljanje i transport otpada, ali i druge namjene (gdje zamjenjuje potrošnju dizelskog goriva). Te alternative i transformirani energetski vektori koriste se u izračunima za zadovoljavanje energetske potrošnje sustava gospodarenja komunalnim otpadom i njegove oporabe.

5.7.2.2. Scenarij: Plan

Scenarij *Plan* dizajniran je na bazi lokalnog plana gospodarenja komunalnim otpadom [242] te je takav sustav prikazan Slika 24.

U ovome slučaju, umjesto da se zbrinjava odlaganjem na odlagalištu, miješani komunalni se preusmjerava u postrojenje za TOO s kogeneracijskom proizvodnjom električne i toplinske energije. Također, navedeno postrojenje separira sekundarne metale iz nastalog pepela koji se vraćaju u lanac materijalne oporabe (što je prikazano putem povratne petlje koja spaja postrojenje za TOO i lanac sortiranja).

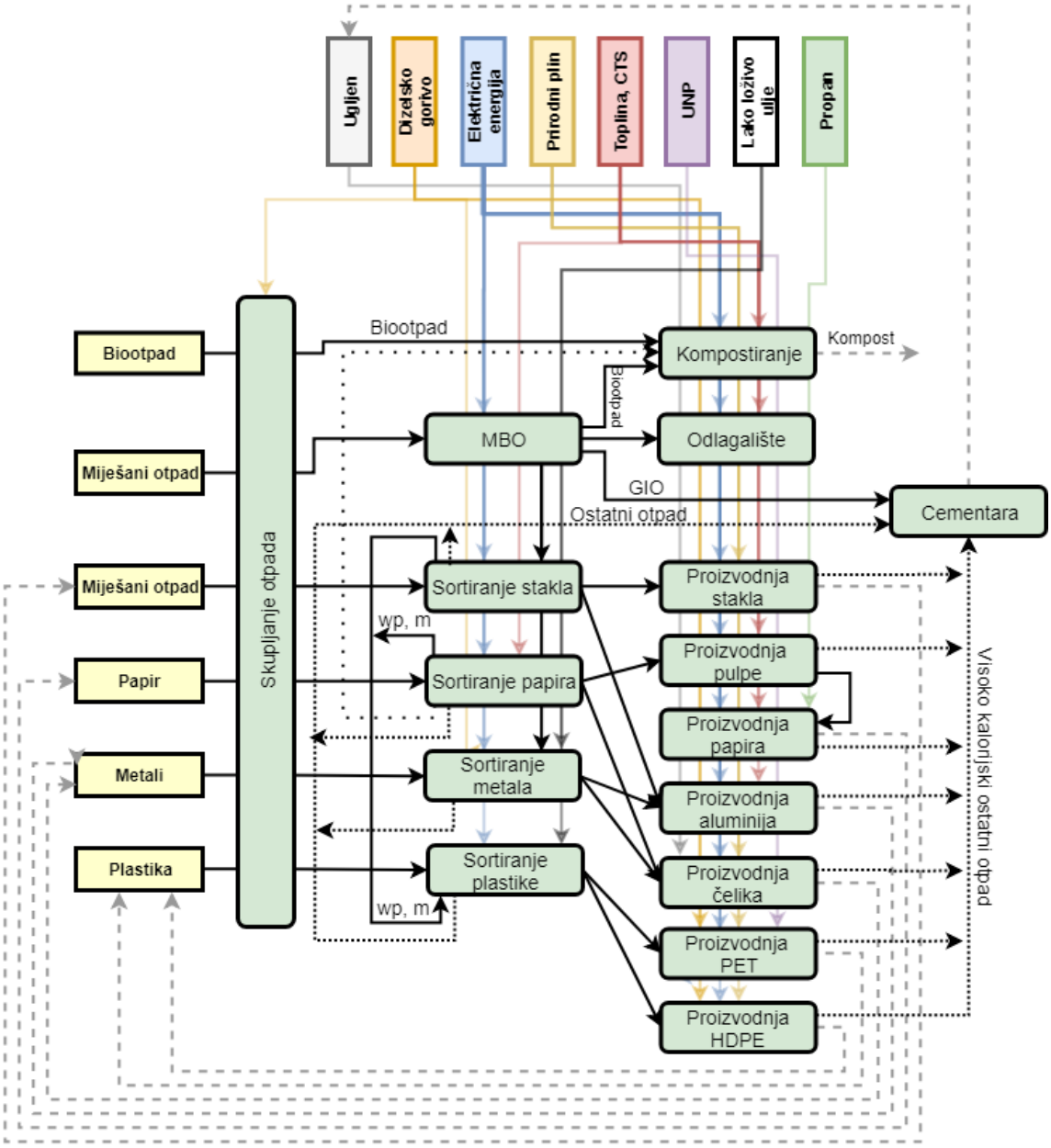
Uz miješani komunalni otpad i prikladni ostatni otpad, nastao iz svakog tehnološkog procesa koji pripada analiziranom sustavu, se također preusmjerava na termičku obradu. Slika 22 – Slika 26 prikazuju samo tokove otpada koji se mogu svrstati pod kategoriju komunalnog otpada. Obrada otpada koji se ne može klasificirati kao komunalni se internalizira unutar svake tehnologije proizvođača otpada kojoj se pridružuje utrošak energije korištenih vanjskih tehnologija za njegovu obradu (kao npr. odlagališta inertnog materijala, termičke obrade opasnog otpada ili podzemnog odlaganja određenih kategorija opasnog otpada), što se može vidjeti na Slika 12. Budući da je sva proizvedena energija unutar ovoga scenarija u obliku električne energije i toplinske energije, nisu modelirane nikakve naknadne energetske transformacije.



Slika 24. Scenarij: Plan

5.7.2.3. Scenarij: Materijalna oporaba

Ovaj scenarij stavlja naglasak na materijalnu oporabu te dodaje MBO postrojenje, tako da se ne oslanja samo na primarnu selekciju kako bi se povećala stopa recikliranja. Shematski prikaz scenarija *Materijalna oporaba* se može vidjeti na Slika 25.

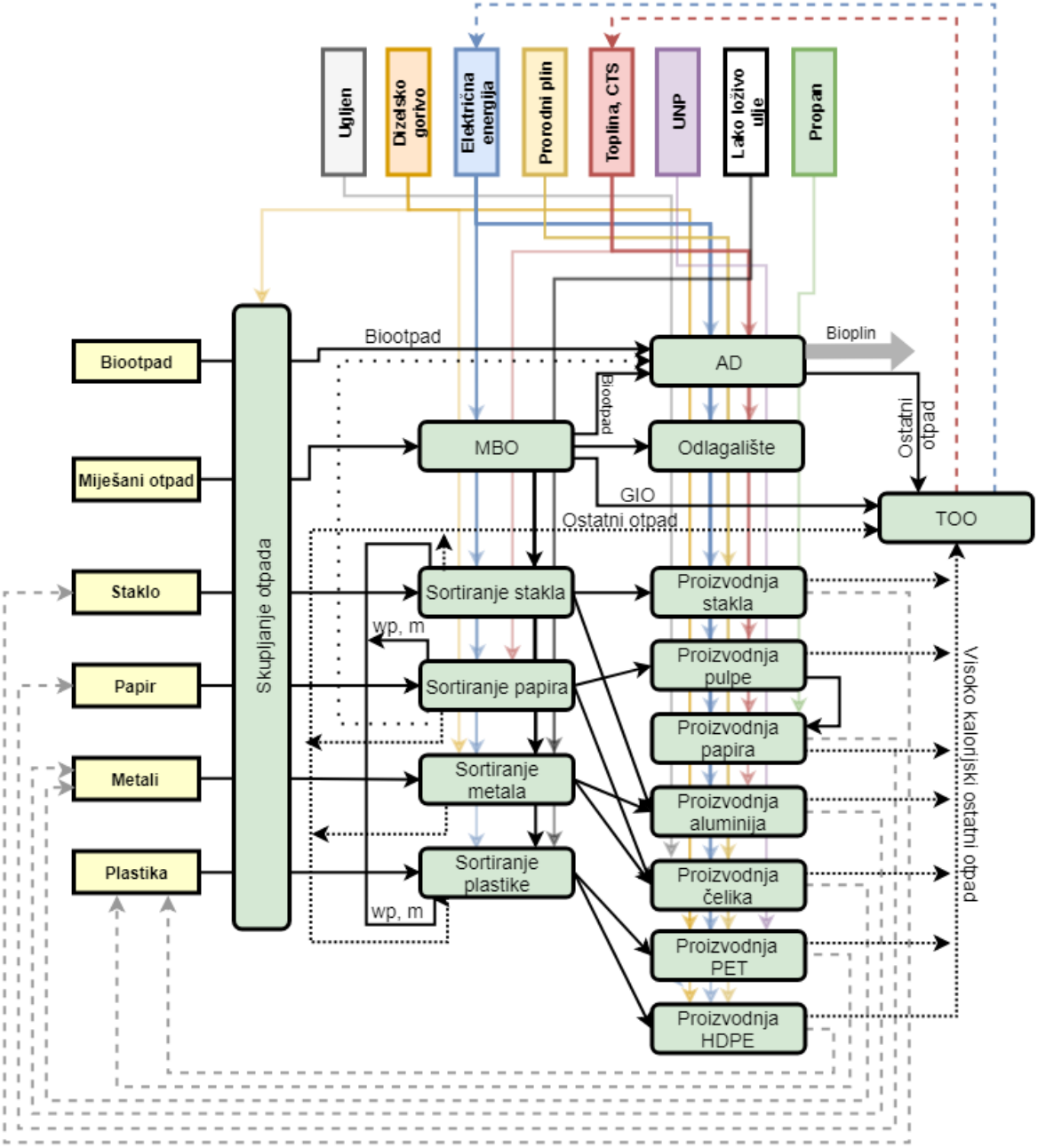


Slika 25. Scenarij: Materijalna oporaba

Postrojenje za MBO također odvaja frakciju GIO koje se odvodi na termičku obradu u vanjsko postrojenje (cementaru) gdje se ona su-spaljuje te time smanjuje potrošnju primarnog goriva – ugljena. Cementara je izabrana kao postrojenje za obradu ostatnog otpada zbog izbjegavanja odlaganja, što je put koji se može iščitati iz europske legislative, kao i izbjegavanja investiranja u postrojenja za energetsku oporabu u ovome scenariju. Kroz termičku obradu, u cementari se također može zbrinuti i ostatni otpad znatne ogrjevne vrijednosti iz ostalih tehnologija. Izdvojena biološka frakcija, u postrojenu za MBO, se kompostira čime se također službeno povećava stopa materijalne oporabe otpada.

5.7.2.4. Scenarij: Energetska oporaba

Posljednji razmatrani scenarij analizira integraciju svih prikladnih tehnologija za energetsku oporabu komunalnog otpada, koje su prepoznate kroz lokalnu legislativu u planove, kako bi se prikazao potencijal energetske oporabe - Slika 26.



Slika 26. Scenarij: Energetska oporaba

U ovome scenariju, za razliku od prethodnog, MBO postrojenje ne izdvaja plastičnu frakciju čime se povećava količina, ali i donja ogrjevna vrijednost GIO što povećava stopu energetske oporabe. Također se odvojena biološka frakcija odvodi u postrojenje za AD. Pošto proizvedeni bioplin nije finalni energetski vektor, on se dalje transformira – razmotrene varijante po pitanju energetske transformacije bioplina prikazane su Slika 23.

6. REZULTATI I DISKUSIJA

Na temelju opisanih scenarija napravljeni su proračuni sukladno metodologiji te su dobiveni rezultati izneseni u slijedećim potpoglavljima: 6.1. Maseni tokovi otpada, 6.2. Energetska potrošnja, 6.3. Materijalna proizvodnja, 6.4. Energetska proizvodnja, 6.5. CED analiza – Analiza utjecaja, 6.6. EE analiza – Analiza održivosti, 6.7. Socioekonomska analiza te 6.8. Multikriterijsko rangiranje.

6.1. Maseni tokovi otpada

Ulazni maseni tokovi otpada za svaku tehnologiju (Q_w) izračunavaju se praćenjem tokova masa iz faze prikupljanja (Tablica 6) te LCI UPR podataka za tehnologije koje prethode analiziranoj tehnologiji u razmatranom lancu gospodarenja otpadom. Tako su ulazni tokovi otpada za tehnologije sortiranja izračunani direktno iz podataka prikazanih Tablica 6 te UPR podataka tehnologija koje imaju vezu s ulazom razmatrane tehnologije te su po scenarijima iskazani u Tablica 10.

Isti princip je korišten i za izračune ulaznih masenih tokova za tehnologije energetske oporabe čiji se rezultati prikazani u Tablica 11 te za tehnologije proizvodnje (recikliranja) u tablici 12. Zajedno s ulaznim masenim tokovima za tehnologije energetske oporabe, u Tablica 11, izraženi su i podaci ulaza u odlagalište otpada pošto ono u scenariju *Postojeći sustav* ima dvostruku ulogu te istodobno i oporabljuje energiju kroz skupljanje odlagališnog plina. Također, izraženi su i podaci o količini otpada koja je zbrinuta putem termičke obrade u cementari.

Iz prikazanih rezultata (Tablica 10) može se vidjeti da je povećanje primarne separacije otpada značajno utjecalo na smanjenje potrebnog kapaciteta postrojenja za sekundarnu separaciju miješanog otpada (mehaničko-biološku obradu (MBO)) do 2020. godine zbog smanjenja količine generiranog miješanog otpada, dok u razdoblju nakon 2020 dolazi do blažeg povećanja zbog povećanja ukupne proizvodnje otpada. S druge strane, napredak u primarnom odvajanju povećava potrebne kapacitete sortirnica za odvojeno skupljeni otpad u svim scenarijima, dok sekundarno odvajanje miješanog otpada još više povećava ulazne tokove ovih tehnologija. Povećanje tokova zbog sekundarne separacije je najviše izraženo kod stakla zbog njegovog velikog udjela u miješanom otpadu te lake separacije. Izuzetak čine otpadna plastika (PET i

HDPE) u scenariju *Energetska oporaba* jer su klasificirani kao goriva komponenta te se ne odvajaju posebno nego su sadržani u GIO. Također integracija sekundarne separacije miješanog otpada niti u jednom scenariju nije povećala količinu papira za recikliranje zbog njegove kontaminiranosti i degradacije do koje dolazi prilikom miješanja s drugim (pogotovo organskim) otpadom. Zbog toga se papir iz miješanog otpada isključivo energetski oporabljuje.

Tablica 10. Ulazni tokovi otpada za tehnologije sortiranja po scenarijima

Scenarij	Staklo [t]	Papir [t]	Metal [t]	Plastika [t]	Miješani [t]
Postojeći sustav - Danas	818	1.447	500	1.712	0
Postojeći sustav - 2020	5.500	59.700	1.700	38.680	0
Postojeći sustav - 2030	9.300	82.200	2.400	66.805	0
Plan - Danas	818	1.447	500	1.712	0
Plan -2020	5.500	59.700	1.700	38.680	0
Plan - 2030	9.300	82.200	2.400	66.805	0
Materijalna oporaba - Danas	8.353	1.447	2.803	57.002	232.587
Materijalna oporaba - 2020	10.450	59.700	3.140	73.078	108.300
Materijalna oporaba - 2030	13.890	82.200	3.570	98.862	123.600
Energetska oporaba - Danas	8.353	1.447	2.803	1.739	232.587
Energetska oporaba - 2020	10.450	59.700	3.140	38.698	108.300
Energetska oporaba - 2030	13.890	82.200	3.570	66.822	123.600

Utjecaj prethodno navedenog vidljiv je i na ulazu u postrojenje za TOO (Tablica 11) gdje primarna separacija otpada smanjuje ulazne tokove. Dodatni doprinos u smanjenju količine otpada na ulazima u postrojenja za TOO donosi integracija postrojenja za MBO miješanog otpada. Ovo smanjenje je najviše izraženo u razdoblju do 2020. godine, dok do 2030. godine dolazi do manjeg povećanja. Što se tiče postrojenja za TOO, smanjenje količine ulaznog otpada se djelomično može nadoknaditi kroz suspaljivanje mulja nastalog kroz AD biootpada. Mulj iz procesa AD mora biti pravilno odložen te je njegova termička obrada (spaljivanje) jedno od mogućih rješenja. Zbog primarne i sekundarne separacije miješanog otpada, količina biootpada se također kontinuirano povećava kroz oba razmatrana perioda. Separirani biootpad se,

sukladno razmatranom scenariju, može koristiti za proizvodnju komposta ili bioplina u postrojenju za AD.

Tablica 11. Ulazni tokovi otpada za tehnologije energetske oporabe i odlaganja

Scenarij	**Tehnologija:**	**AD**	**Termička obrada otpada**				**Cementara**	**Odlagalište**
	Ulaz:	Bio	Miješani	AD mulj	Ostatni	GIO	GIO	Ostatni
Postojeći sustav - Danas		0	0	0	0	0	0	265.379
Postojeći sustav - 2020		0	0	0	0	0	0	157.209
Postojeći sustav - 2030		0	0	0	0	0	0	189.807
Plan - Danas		0	233.282	0	0	0	0	0
Plan -2020		0	124.209	0	0	0	0	0
Plan - 2030		0	150.507	0	0	0	0	0
Materijalna oporaba - Danas		0	0	0	0	0	99.276	23.259
Materijalna oporaba - 2020		0	0	0	0	0	71.326	10.830
Materijalna oporaba - 2030		0	0	0	0	0	94.229	12.360
Energetska oporaba - Danas		97.856	0	129.963	1.010	133.342	0	23.259
Energetska oporaba - 2020		121.284	0	161.077	16.115	77.040	0	10.830
Energetska oporaba - 2030		151.660	0	201.420	27.096	87.480	0	12.360

U scenarijima *Postojeći sustav* i *Plan* (kao što se može vidjeti iz rezultata u Tablica 12), ne postoji razlika u ulaznim količinama otpada u tehnologije za materijalnu oporabu otpada, pošto se prikupljaju jednake količine otpada, a miješani komunalni otpad se ne odvaja nego se deponira ili termički obrađuje. Jedina razlika je u ulazu u postrojenja za separaciju i materijalnu oporabu metala zbog izdvajanja metala iz proizvedenog pepela nakon procesa termičke obrade.

Što se tiče scenarija *Materijalna oporaba*, zbog izbjegavanja investiranja u postrojenja za energetsku oporabu, separirana goriva frakcija otpada (GIO) se zbrinjava putem vanjskog postrojenja (cementare) dok se dio koji nije pogodan za termičku obradu odlaže. Udio

odloženog otpada u svim scenarijima je manji od 10% čime su zadovoljeni ciljevi zacrtani europskom legislativom. Scenarij *Energetska oporaba* također, kao i scenarij *Materijalna oporaba*, pokazuje povećanje ulaznih tokova u lancu materijalne oporabe zbog sekundarne separacije.

Tablica 12. Ulazni tokovi otpada za tehnologije materijalne oporabe po scenarijima

Scenarij	**Staklo [t]**	**Papir [t]**	**Aluminij [t]**	**Čelik [t]**	**PET [t]**	**HDPE [t]**	**Kompost [t]**
Postojeći sustav - Danas	757	1.433	57	448	990	287	31.708
Postojeći sustav - 2020	5.093	59.028	206	1.564	22.359	6.484	107.244
Postojeći sustav - 2030	8.611	81.280	298	2.206	38.616	11.199	133.660
Plan - Danas	757	1.433	278	2.314	990	287	31.708
Plan -2020	5.093	59.028	361	2.876	22.359	6.484	107.244
Plan - 2030	8.611	81.280	412	3.164	38.616	11.199	133.660
Materijalna oporaba - Danas	7.735	1.459	336	2.507	31.949	9555	97.856
Materijalna oporaba - 2020	9.676	59.045	382	2.851	42.242	12.250	121.284
Materijalna oporaba - 2030	12.861	81.296	444	3.252	57.145	16.572	151.660
Energetska oporaba - Danas	7.735	1.459	336	2.507	1.005	291	0
Energetska oporaba - 2020	9.676	59.045	382	2.851	22.369	6.487	0
Energetska oporaba - 2030	12.861	81.296	444	3.252	38.625	11.201	0

6.2. Energetska potrošnja

Energetski zahtjevi sustava gospodarenja i oporabe otpada ovise o scenarijima, koji definiraju koje su tehnologije korištene te o samim tehnologijama, koje su definirane LCI UPR podacima. Na temelju prethodno izračunanih masenih ulaznih tokova i UPR podataka, prema jednadžbi (7) izračunane su, između ostalog, i energetske potrošnje svake tehnologije pojedinačno te s time i cijeloga sustava. Izračunane potrošnje svakog scenarija po fazama i energetskim

vektorima prikazane su u Tablica 13 – Tablica *24*. U navedenim tablicama izražene se neposredne potrošnje energenata za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijsku proizvodnju. Razlike u odnosu na druge dvije varijante iskazane su u Tablica 25.

Tablica 13. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Postojeći sustav - Danas

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	68	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	978.266	20.612	153.571	47.667	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	28.582	0
Ugljen (kg)	0	0	0	5.679	0
Prirodni plin (m^3)	0	0	0	163.396	0
Električna en. (kWh)	0	0	6.018.653	3.468.921	2.381.244
Toplinska en. (MJ)	0	0	288.283	19.484.088	908.821
Propan (MJ)	0	0	0	105.508	0
UNP (kg)	0	0	0	275	0

Tablica 14. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Postojeći sustav – 2020.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	231	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.166.620	492.145	2.611.448	170.256	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	192.296	0
Ugljen (kg)	0	0	0	19.812	0
Prirodni plin (m^3)	0	0	0	2.064.236	0
Električna en. (kWh)	0	0	6.946.511	112.497.041	1.410.639
Toplinska en. (MJ)	0	0	1.758.586	796.164.133	538.382
Propan (MJ)	0	0	0	4.345.754	0
UNP (kg)	0	0	0	6.220	0

Tablica 15. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Postojeći sustav – 2030.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	326	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.518.244	738.779	4.462.326	219.046	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	325.155	0
Ugljen (kg)	0	0	0	27.951	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	3.531.965	0
Električna en. (kWh)	0	0	10.189.034	159.230.537	1.703.142
Toplinska en. (MJ)	0	0	2.453.110	1.096.327.430	650.018
Propan (MJ)	0	0	0	5.984.046	0
UNP (kg)	0	0	0	10.743	0

Tablica 16. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Plan - Danas

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	68	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	978.266	20.612	153.571	47.667	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	28.582	0
Ugljen (kg)	0	0	0	29.314	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	205.601	0
Električna en. (kWh)	0	0	6.018.653	4.184.053	0
Toplinska en. (MJ)	0	0	288.282	19.484.088	30.492.266
Propan (MJ)	0	0	0	105.508	0
UNP (kg)	0	0	0	275	0

Tablica 17. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Plan – 2020.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	231	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.166.620	492.145	2.611.448	170.256	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	192.296	0
Ugljen (kg)	0	0	0	36.443	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	2.093.935	0
Električna en. (kWh)	0	0	6.946.511	113.000.268	0
Toplinska en. (MJ)	0	0	1.758.586	796.164.133	16.235.399
Propan (MJ)	0	0	0	4.345.754	0
UNP (kg)	0	0	0	6.220	0

Tablica 18. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Plan – 2030.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	326	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.518.244	738.779	4.462.326	219.046	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	325.155	0
Ugljen (kg)	0	0	0	40.091	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	3.553.643	0
Električna en. (kWh)	0	0	10.189.034	159.597.861	0
Toplinska en. (MJ)	0	0	2.453.110	1.096.327.430	19.672.835
Propan (MJ)	0	0	0	5.984.046	0
UNP (kg)	0	0	0	10.743	0

Tablica 19. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba - Danas

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	381	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	978.267	689.266	3.874.993	164.285	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	292.058	0
Ugljen (kg)	0	0	0	31.766	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	3.074.008	0
Električna en. (kWh)	0	0	11.294.954	22.800.278	208.700
Toplinska en. (MJ)	0	0	1.520.821	20.614.753	79.652
Propan (MJ)	0	0	0	107.450	0
UNP (kg)	0	0	0	9.167	0

Tablica 20. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba – 2020.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	427.04	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.166.620	878.675	4.927.347	204.079	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	365.363	0
Ugljen (kg)	0	0	0	36.126	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	3.904.111	0
Električna en. (kWh)	0	0	10.230.440	124.416.853	97.178
Toplinska en. (MJ)	0	0	2.529.387	796.882.417	37.089
Propan (MJ)	0	0	0	4.347.030	0
UNP (kg)	0	0	0	11.753	0

Tablica 21. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba – 2030.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	486	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.518.244	1.179.549	6.605.214	257.636	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	485.636	0
Ugljen (kg)	0	0	0	41.206	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	5.240.578	0
Električna en. (kWh)	0	0	13.239.156	170.303.421	110.906
Toplinska en. (MJ)	0	0	3.079.385	1.096.937.837	42.328
Propan (MJ)	0	0	0	5.985.229	0
UNP (kg)	0	0	0	15.899	0

Tablica 22. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Energetska oporaba - Danas

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	381	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	978.266	68.973	361.178	16.408	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	292.057	0
Ugljen (kg)	0	0	0	31.765	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	1.043.984	0
Električna en. (kWh)	0	0	6.183.951	5.915.357	3.483.362
Toplinska en. (MJ)	0	0	1.520.820	20.614.752	113.278.835
Propan (MJ)	0	0	0	107.449	0
UNP (kg)	0	0	0	279	0

Tablica 23. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Energetska oporaba – 2020.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	427	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.166.620	523.535	2.741.334	24.665	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	365.362	0
Ugljen (kg)	0	0	0	36.126	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	2.641.194	0
Električna en. (kWh)	0	0	7.050.787	113.527.524	4.155.814
Toplinska en. (MJ)	0	0	2.529.386	796.882.417	130.932.381
Propan (MJ)	0	0	0	4.347.029	0
UNP (kg)	0	0	0	6.223	0

Tablica 24. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Energetska oporaba – 2030.

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako loživo ulje (kg)	0	0	485	0	0
Dizelsko gorivo (kg)	1.518.244	767.027	4.567.988	34.528	0
Teško loživo ulje (kg)	0	0	0	485.635	0
Ugljen (kg)	0	0	0	41.206	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	4.063.619	0
Električna en. (kWh)	0	0	10.275.919	159.909.097	5.186.061
Toplinska en. (MJ)	0	0	3.079.385	1.096.937.837	163.555.599
Propan (MJ)	0	0	0	5.985.229	0
UNP (kg)	0	0	0	10.746	0

Podaci pokazuju da potrošnja energije, po svakoj od faza, slijedi kretanja u ulaznoj količini otpada koji ulazi u pojedini lanac/tehnologiju, što je sukladno načinu definiranja tehnologija putem LCI UPR podataka. Podaci pokazuju da ne postoji razlika u potrošnji dizelskog goriva za skupljanje otpada između svih razmatranih scenarija. Što se tiče transporta, uvođenje

sekundarne separacije otpada povećava količinu odvojenog otpada koja se transportira do postrojenja za materijalnu oporabu što povećava i utrošak energije u transportu otpada. Ovo je još više izraženo u scenariju *Materijalna oporaba* pošto se izdvaja više frakcija iz miješanog otpada koje se trebaju prevesti u postrojenja za materijalnu oporabu (recikliranje) koja su pozicionirana izvan grada. Osim toga i separirani ostatni gorivi otpad se također u ovome scenariju prevozi u vanjsko postrojenje – cementaru.

Što se tiče faze separacije, ovdje se može vidjeti očekivana situacija da scenarij s najvećom materijalnom oporabom (*Materijalna oporaba*) ima i najveći utrošak energije, dok ga prati drugi scenarij s integriranom sekundarnom separacijom (*Energetska oporaba*). Razlika u udjelu pojedinog energenta prvenstveno ovisi o vrstama separiranog otpada u postrojenju za MBO što povećava energetsku potrošnju pojedinih tehnologija za separaciju specifičnih materijala – razlika u utrošenoj energiji između scenarija Materijalna i Energetska separacija proizlazi prvenstveno iz toga što sekundarna separacija u scenariju Materijalna separacija dodatno separira i plastičnu frakciju što dovodi do povećanja potrošnje električne energije i dizela koji su, prema LCI UPR podacima, značajno korišteni u tehnologijama separacije plastičnih materijala.

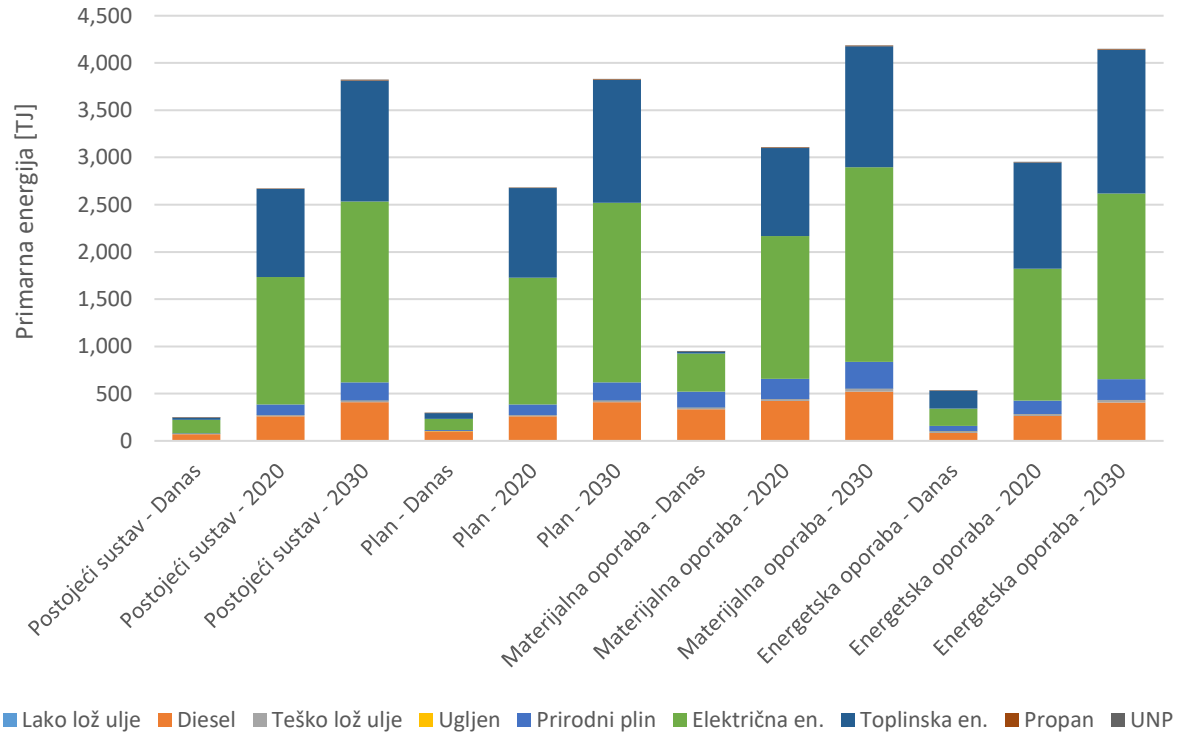
Isto vrijedi i za fazu materijalne oporabe. U ovoj fazi možemo zamijetiti relativno istu potrošnju toplinske energije i propana kroz sve scenarije, što se može objasniti time da je velika većina potrošnje ovih vektora sadržana u tehnologijama materijalne oporabe otpadnog papira u pulpu i papir, čija proizvodnja ovisi isključivo o otpadnom materijalu prikupljenom putem primarne separacije otpada što rezultira istim prikupljenim količinama otpadnih materijala kroz sve analizirane scenarije.

U fazi energetske oporabe, jedina dva scenarija koja imaju značajnu energetsku potrošnju su scenariji s integriranom TOO – scenariji *Plan* i *Energetska oporaba*. Značajno veća potrošnja je u scenariju *Energetska oporaba* zbog postojanja postrojenja za AD biootpada koje istovremeno proizvodi i značajne količine digestorskog mulja koji se zbrinjava putem termičke obrade. Iako ova postrojenja proizvode i toplinsku i električnu energiju, iste energente čija je potrošnja iskazana, te čija proizvodnja premašuje potrošnju, potrošnja i proizvodnja su nezavisno iskazane.

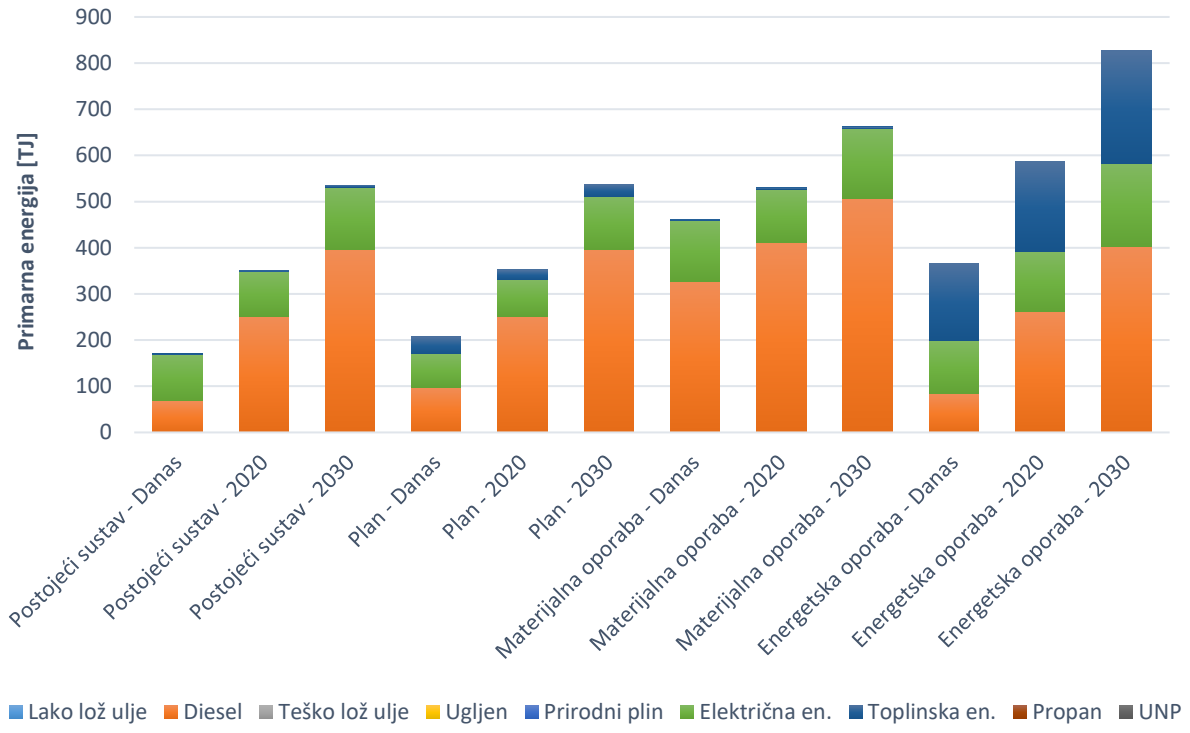
Kao što su aktivnosti obuhvaćene u fazama prikupljanja, razvrstavanja i energetske oporabe otpada u urbanim regijama uobičajeno lokalno bazirane (postrojenja obuhvaćenih aktivnosti se

nalaze unutar granica razmatranog grada), faza materijalne oporabe (tj. obuhvaćene tehnologije) nije fizički vezana za jedno područje generiranja otpada. Stoga je ukupna energetska potrošnja analiziranih scenarija prikazana u dijagramima, zasebno kao lokalna potrošnja (Slika 28) koja uključuje potrošnju lokalnih tehnologija te kao ukupna potrošnja (Slika 27) koja uključuje potrošnju svih analiziranih faza te povezanih tehnologija.

Za razliku od prije prikazanih podataka, na dijagramima na Slika 27 i 28, da bi se omogućila usporedba energetske potrošnje po pojedinim energentima, prikazana je potrošnja ekvivalenata primarne energije. Vrijednosti prikazane na Slika 27 dobivene su sumiranjem potrošnje pojedinih energetskih vektora, prikazanih Tablica 13 – Tablica *24* te množenjem dobivene sume s pripadajućom vrijednosti CED indikatora za predmetni energetski vektor. Za razliku od Slika 27, na Slika 28 prikazana je potrošnja samo lokalno baziranih tehnologija tj. izuzeta je potrošnja postrojenja za materijalnu oporabu sukladno prethodno opisanoj metodologiji.



Slika 27. Ukupna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima



Slika 28. Potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima na lokalnoj razini

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da električna i toplinska energija čine većinu ukupnih energetskih potreba razmatranih sustava, dok ako se gleda samo lokalna potrošnja (unutar granica promatranog grada), potrošnja dizela postaje najznačajnija. Iz ovoga proizlazi da je industrija proizvodnje materijala, zajedno s TOO, glavni potrošač toplinske i električne energije u razmatranim sustavima.

Prethodno prikazani podaci predstavljaju potrošnju varijante u kojoj se proizvedeni bioplin transformira u kogeneracijskom postrojenju s bioplinskim motorom gdje se kao izlaz dobivaju električna i toplinska energiju. Budući da ostale dvije analizirane transformacije predstavljaju složenije varijante, one za sobom povlače dodatnu energetsku potrošnju koja je prikazana Tablica 25 iTablica *26*.

Tablica 25. Dodatna neposredna potrošnja energenata sukladno razmatranim varijantama

Varijanta	Energent	Postojeći sustav - Danas	Postojeći sustav - 2020	Postojeći sustav - 2030	Energetska oporaba Danas	Energetska oporaba 2020	Energetska oporaba 2030
Biometan u mrežu	Električna energija (MWh)	6.365	2.663	3.693	5.419	6.888	8.692
Biometan u SPP	Električna energija (MWh)	6.445	2.697	3.739	5.487	6.974	8.801

Tablica 26. Dodatna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim varijantama

Varijanta	Postojeći sustav - Danas [GJ]	Postojeći sustav - 2020 [GJ]	Postojeći sustav - 2030 [GJ]	Energetska oporaba Danas [GJ]	Energetska oporaba 2020 [GJ]	Energetska oporaba 2030 [GJ]
Biometan u mrežu	70.215	29.378	40.736	59.778	75.980	95.883
Biometan u SPP	71.093	29.745	41.245	60.525	76.929	97.081

Prema prikazanim podacima, dodatna energetska potrošnja za pročišćavanje bioplina u biometan kreće se u rasponu od 1% do 29% na razini ukupne potrošnje za scenarij *Postojeći sustav* te 2% do 11% za scenarij *Energetska oporaba*. Ove vrijednosti za lokalnu razinu se kreću u rasponu od 7% do 41% za scenarij *Postojeći sustav* te 12% do 16% za scenarij *Energetska oporaba*. Veliki raspon kod scenarija Postojeći sustav rezultat je velike razlike u proizvodnji bioplina po pojedinim vremenskim okvirima te razlike u potrošnji energije ukupnog sustava sukladno promjeni količine primarno separiranog otpada. Što se tiče dodatnog komprimiranja biometana u SPP, dodatna potrošnja u odnosu na prethodnu varijantu je relativno mala te je na razini do 1%.

6.3. Materijalna proizvodnja

Proizvodnja sekundarnih materijala iz postrojenja za materijalnu oporabu otpada izračunana je na bazi prethodno izračunanih materijalnih i energetskih tokova te odgovarajućih LCI UPR podataka – jednadžba (8). Dobivene proizvodnje po materijalima prikazane su Tablica 27.

Tablica 27. Proizvodnja sekundarnih materijala i komposta po scenarijima

	Staklo [t]	**Papir [t]**	**Aluminij [t]**	**Čelik [t]**	**PET [t]**	**HDPE [t]**	**Kompost [t]**
Postojeći sustav - Danas	1.211	1.942	56	406	811	254	17.122
Postojeći sustav - 2020	8.148	80.001	204	1.415	18.327	5.747	57.910
Postojeći sustav - 2030	13.778	110.161	296	1.997	31.652	9.926	72.175
Plan - Danas	1.211	1.942	275	5.472	811	254	17.122
Plan -2020	8.148	80.001	358	2.603	18.327	5.747	57.910
Plan - 2030	13.778	110.161	408	2.864	31.652	9.926	72.175
Materijalna oporaba - Danas	12.375	1.978	333	2.269	27.007	8.469	52.841
Materijalna oporaba - 2020	15.481	80.025	379	2.580	34.624	10.858	65.491
Materijalna oporaba - 2030	20.578	110.183	440	2.943	46.840	14.689	81.894
Energetska oporaba - Danas	12.375	1.978	333	2.269	824	258	0
Energetska oporaba - 2020	15.481	80.025	379	2.580	18.335	5.750	0
Energetska oporaba - 2030	20.578	110.183	440	2.943	31.660	9.928	0

Kao što se može vidjeti, proizvodnja materijala prati prethodno izračunane masene tokove. Dok se sve količine proizvedenih materijala mijenjaju sukladno scenarijima, proizvodnja papira se vrlo malo razlikuje između scenarija (Tablica 27), što je posljedica nemogućnosti naknadne separacije papira te isključiva ovisnost o primarnoj separaciji. Generirana razlika je rezultat veza između tehnologija separacije i rezultat je povećane separacije ostalih materijala zbog uvođenja sekundarne separacije miješanog otpada (u postrojenjima za MBO) u scenarijima *Materijalna oporaba* i *Energetska oporaba*. Pošto scenarij *Postojeći sustav* i *Plan* nemaju

integrirano MBO postrojenje, količina proizvedenih materijala u predmetnim scenarijima je ista s izuzetkom metala pošto se oni u scenariju *Plan* naknadno izdvajaju iz proizvedenog pepela – Tablica 27. Utjecaj MBO se također može vidjeti i u podacima za scenarije *Materijalna oporaba* i *Energetska oporaba* gdje je razlika uočljiva samo za materijale koji se ne odvajaju (plastični materijali u scenariju *Energetska oporaba* su korišteni kao dio GIO) te za kompost pošto se biološka komponenta otpada u scenariju *Energetska oporaba* koristi za energetsku proizvodnju putem AD.

6.4. Energetska proizvodnja

Na temelju svih prethodno izračunanih ulaznih tokova, prema jednadžbi (7), izračunana je neposredna proizvodnja energetskih vektora po tehnologijama - Tablica 28. Rezultati daljnjih transformacija proizvedenog bioplina, kao i ukupni podaci, prikazani su u Tablica 29 - Tablica *31*.

Tablica 28. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – neposredna proizvodnja

Teh	Produkt	Sadašnji sustav - Danas	Sadašnji sustav - 2020	Sadašnji sustav - 2030	Plan - Danas	Plan - 2020	Plan - 2030	Energ. Opor. - Danas	Energ. Opor. - 2020	Energ. Opor. - 2030
AD	Bioplin (10^3 Nm3)	0	0	0	0	0	0	16.258	20.664	26.077
TOO	El. energ. (MWh)	0	0	0	119.079	71.767	81.917	111.238	67.779	77.112
	Toplina (GJ)	0	0	0	1.908.416	1.150.174	1.312.838	1.780.037	998.116	1.106.309
Odlagalište	Odlagališni plin (10^3 Nm3)	19.096	7.990	11.079	0	0	0	0	0	0

Tablica 29. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Upotreba bioplina u kogeneracijskoj proizvodnji

Ulaz	Produkt	Sadašnji sustav - Danas	Sadašnji sustav - 2020	Sadašnji sustav - 2030	Plan - Danas	Plan - 2020	Plan - 2030	Energ. oporaba - Danas	Energ. oporaba - 2020	Energ. oporaba - 2030
Bioplin iz AD	El. energ (MWh)	0	0	0	0	0	0	32.645	41.908	53.078
	Toplina (GJ)	0	0	0	0	0	0	202.020	259.306	328.418
Odlagališni plin	El. energ (MWh)	37.844	15.770	21.850	0	0	0	0	0	0
	Toplina (GJ)	234.162	97.580	135.195	0	0	0	0	0	0
Ukupna proizvodnja*	El. energ (MWh)	37.844	15.770	21.850	119.079	71.767	81.917	143.887	109.687	130.190
	Toplina (GJ)	234.162	97.580	135.195	1.908.416	1.150.174	1.312.838	1.982.057	1.257.422	1.434.727

* Uključujući prethodne faze i proizvodnju energije iz ostalih tehnologija

Tablica 30. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u mrežu

Ulaz	Produkt	Sadašnji sustav - Danas	Sadašnji sustav - 2020	Sadašnji sustav - 2030	Plan - Danas	Plan - 2020	Plan - 2030	Energ. oporaba - Danas	Energ. oporaba - 2020	Energ. oporaba - 2030
Bioplin iz AD	Metan (5 bar) (10^3 m3)	0	0	0	0	0	0	10.838	13.776	17.385
Odlagališni plin	Metan (5 bar) (10^3 m3)	12.731	5.327	7.386	0	0	0	0	0	0
Ukupna proizvodnja*	El. energ (MWh)	0	0	0	119.079	71.767	81.917	111.238	67.779	77.112
	Toplina (GJ)	0	0	0	1.908.416	1.150.174	1.312.838	1.780.037	998.116	1.106.309
	Metan (5 bar) (10^3 m3)	12.731	5.327	7.386	0	0	0	10.838	13.776	17.385

* Uključujući prethodne faze i proizvodnju energije iz ostalih tehnologija

Tablica 31. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u SPP

Ulaz	Produkt	Sadašnji sustav - Danas	Sadašnji sustav - 2020	Sadašnji sustav - 2030	Plan - Danas	Plan - 2020	Plan - 2030	Energ. oporaba - Danas	Energ. oporaba - 2020	Energ. oporaba - 2030
Metan (5 bar) iz AD	Metan (200 bar) (kg)	0	0	0	0	0	0	325.421	413.615	521.968
Metan (5 bar) iz odlagališnog plina	Metan (200 bar) (kg)	382.236	159.928	221.760	0	0	0	0	0	0
Ukupna proizvodnja*	El. energ (MWh)	0	0	0	119.079	71.767	81.917	111.238	67.779	77.112
	Toplina (GJ)	0	0	0	1.908.416	1.150.174	1.312.838	1.780.037	998.116	1.106.309
	Metan (200 bar) (kg)	311.523	130.342	180.734	0	0	0	265.218	337.097	425.404

* Uključujući prethodne faze i proizvodnju energije iz ostalih tehnologija

Može se zaključiti da se većina energije proizvodi kroz skupljanje odlagališnih plinova u scenariju Današnji sustav te kroz TOO u druga dva prikazana scenarija. U scenariju *Energetska oporaba*, proizvodnja toplinske i električne energije iz bioplina je najveća te zajedno s proizvodnjom putem TOO dovodi do najveće ukupne energetske proizvodnje od svih razmatranih scenarija. Prinos bioplina je veći samo u scenariju Sadašnji sustav s aktualnom količinom odloženog otpada, a time i većom proizvodnjom biometana.

Pri izračunu zamjene korištenog goriva u transportu, mora se uzeti u obzir razlika u potrošnji goriva između postojeće (dizelske) i nove (SPP) flote vozila. Tako je u prikazanim podacima (Tablica 31), na temelju podataka iz literature o potrošnji vozila sukladno korištenom gorivu [245], smanjena proizvodnja metana (200 bara) kako bi se nadoknadila povećana potrošnja CNG u usporedbi s dizelskim vozilima. To je učinjeno kako bi se omogućila usporedba

potrošnje dizelskog goriva i SPP-a u floti vozila za skupljanje otpada kao i analiza pokrivenosti potrošnje goriva putem proizvodnje alternativnog goriva.

Kao što se može vidjeti, u prikazane podatke nisu uvršteni podaci za scenarij *Materijalna oporaba* iz razloga što navedeni scenarij ne rezultira neposrednom energetskom proizvodnjom, iako se u njemu ostatni otpad energetski oporabljuje putem vanjske tehnologije – suspaljivanjem u cementari. Na ovaj način dolazi do zamjene određenog dijela primarnog goriva putem otpada po metodi ekvivalentno dovedene topline. Pa tako 78.080 / 46.660 / 55.440 tona otpada iz MBO postrojenja, kroz suspaljivanje u cementari, zamjenjuje 30.652 / 14.516 / 19.101 tona ugljena po pojedinom razmatranom vremenskom razdoblju (Danas, 2020, 2030).

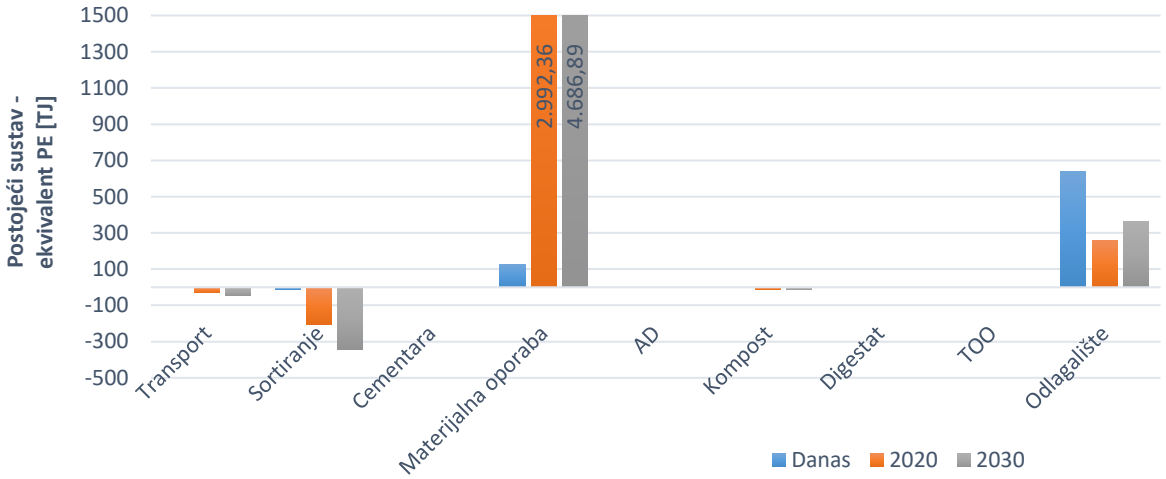
6.5. CED analiza - Analiza utjecaja

Praćenjem masenih tokova otpada kroz analizirani sustav (Q_w), uz pomoć LCI UPR podataka, prema jednadžbama (7) – (9), izračunane su vrijednosti ulaznih i izlaznih energetskih (E) i masenih (M) tokova, kao i tokova otpada (W) za svaku pojedinu tehnologiju. Tako dobiveni rezultati za tokove materijalne (masene) i energetske proizvodnje, kao i energetske potrošnje, prikazani su i diskutirani u poglavljima 6.2 – 6.4. Ostali izračunani maseni tokovi dobiveni kroz prethodno definiranu metodologiju, zbog njihovog velikog broja te nepostojanja značaja njihove diskusije vezane s ciljem predmetnog istraživanja, nisu posebno iskazivani.

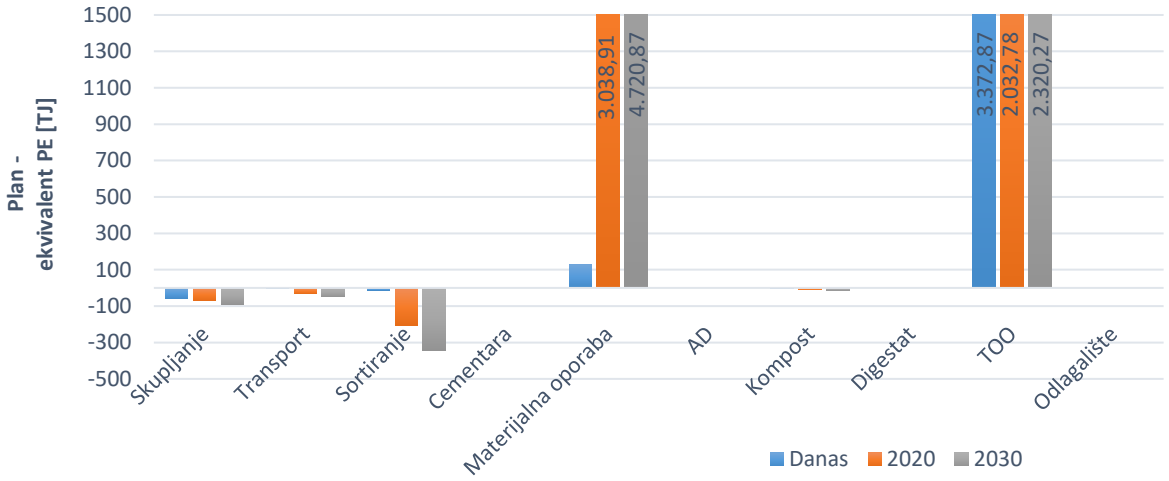
6.5.1. Povrat primarne energije

Na bazi dobivenih rezultata, koristeći jednadžbe (10) i (11), izračunane su potrošnje i proizvodnje primarne energije po tehnologijama. Na bazi dobivenih rezultata te jednadžbe (12), provedena je analiza utjecaja na okoliš kroz izračun CED indikatora. Za razliku od pristupa koji se koristi u uobičajenim LCA CED analizama, koje su objavljene u velikom broju radova, gdje se prikazuje samo završna vrijednost CED indikatora za cjelokupan analizirani sustav (što odgovara načinu prikazivanja rezultata prilikom provođenja CED analize putem LCA programskog paketa), ovdje je izračun sveden na razinu tehnologija. Zbog preglednosti, ovako dobiveni rezultati su sumirani na razini pojedinih vrsta tehnologija u sustavu te prikazani dijagramima na Slika 29 – Slika *32*.

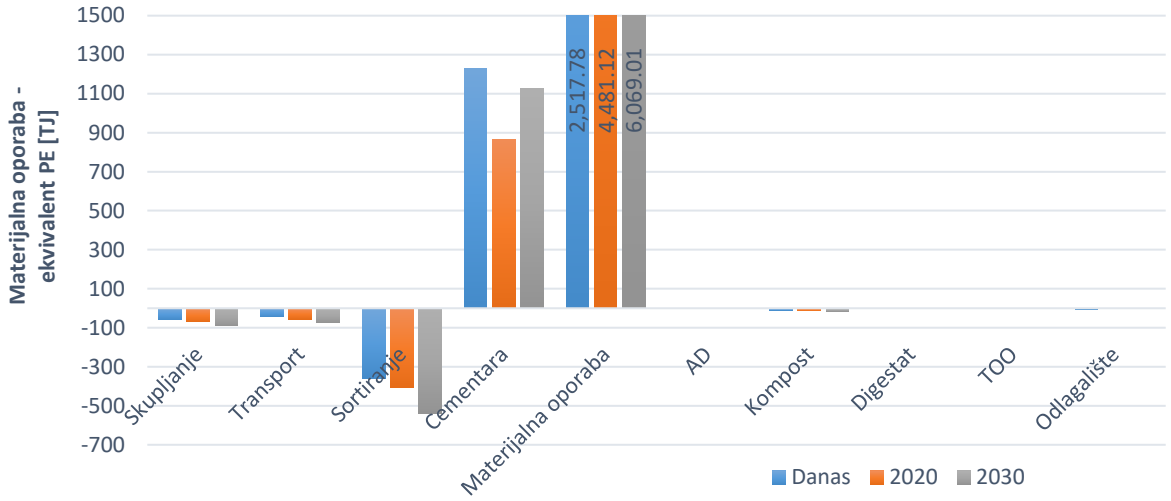
Rezultati prikazani Slika 29 – Slika *32* prikazuju ukupnu potrošnju i proizvodnju pojedine vrste razmatranih tehnologija. Sukladno iznesenoj metodologiji, kako bi se istom veličinom (na istom dijagramu) mogli prikazati maseni i energetski tokovi, ove veličine su, koristeći CED indikator, svedene na ekvivalente primarne energije.



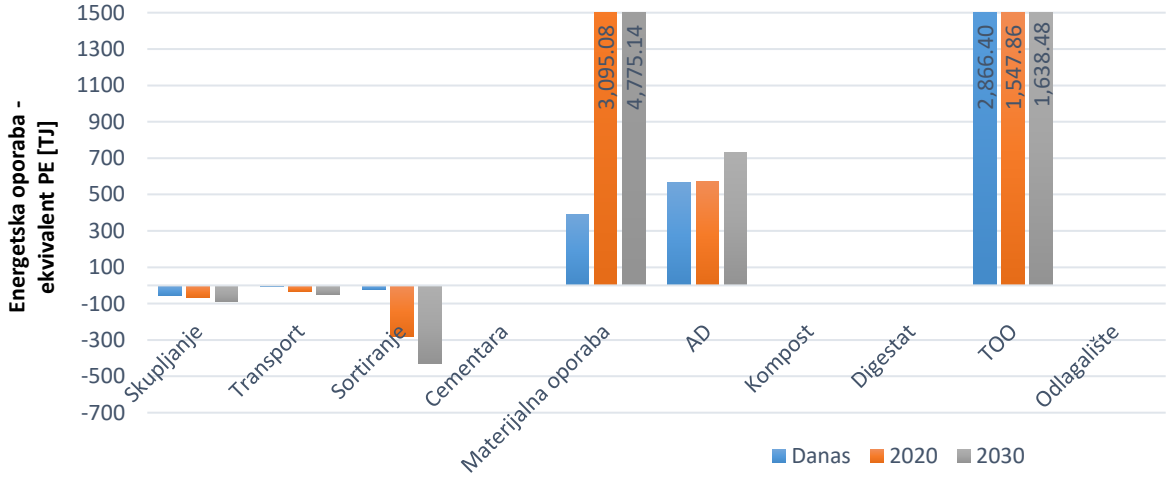
Slika 29. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Postojeći sustav



Slika 30. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Plan



Slika 31. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Materijalna oporaba



Slika 32. CED rezultati po vrstama tehnologije - Scenarij: Energetska oporaba

Na Slika 29 – Slika *32*, pozitivne vrijednosti ekvivalenata primarne energije ukazuju na povrat (proizvodnju), dok negativne vrijednosti na neto potrošnju PE. Scenarij *Postojeći sustav* za većinu stvarnog povrata primarne energije može zahvaliti skupljanju bioplina iz odlagališta otpada (pretvaranje energije sadržane u odlagališnom plinu u električnu i toplinsku energiju putem kogeneracijskog postrojenja s plinskim motorom). Prema prikazanim podacima za razmatrana vremenska razdoblja vidi se da primarna separacija otpada prebacuje fokus na materijalnu oporabu čak i u ovom scenariju (scenariju *Postojeći sustav*) koji ne obuhvaća nikakve tehnološke promjene u samom sustavu.

Rezultati scenarija *Plan* su vrlo slični rezultatima scenarija *Postojeći sustav*, jedina razlika je u puno većoj energetskoj oporabi putem TOO nego putem bioplina s odlagališta za istu količinu dovedenog otpada, što dovodi do povećanja povrata PE. Osim toga, malo je povećan i povrat primarne energije kroz materijalnu oporabu zbog separacije metala iz proizvedenog pepela u postrojenju za TOO.

U scenariju *Materijalna oporaba*, uvodi se postrojenje za MBO miješanog otpada koje dovodi do povećanja povrata primarne energije kroz materijalnu oporabu materijala, ali istovremeno i povećava potrošnju energije za sortiranje otpada. Također, povrat primarne energije se osigurava i kroz zamjenu dijela primarnog goriva (ugljena) suspaljivanjem GIO u cementari.

Iako je i u scenariju *Energetska oporaba* uvedeno postrojenje za MBO miješanog komunalnog otpada, razlika u povratu primarne energije kroz materijalnu oporabu u usporedbi sa scenarijem *Plan* je minimalna. To je zbog toga što se u ovome slučaju plastika ne odvaja u postrojenju za MBO u poseban materijalni tok namijenjen materijalnoj oporabi, već povećava ogrjevnu vrijednost proizvedenog GIO.

Iako scenarij *Postojeći sustav* ima veći povrat primarne energije kroz postrojenje za TOO, postrojenje za MBO u sprezi s postrojenjem za AD biootpada nadoknađuje tu razliku. Scenarij *Materijalna oporaba* i scenarij *Energetska oporaba*, pokazuju veliku razliku u materijalnoj oporabi za današnju (stvarnu) situaciju po pitanju skupljanja otpada, ali ta se razlika smanjuje s godinama, budući da je sve više i više otpada primarno separirano. Također, energetska oporaba u peći cementare pokazuje veliki potencijal povećanja održivosti bez ulaganja u zasebno postrojenje za energetsku oporabu. S druge strane, izgradnja postrojenja za TOO pomaže uvođenju AD u sustav gospodarenja komunalnim otpadom osiguravajući siguran način za obradu odnosno zbrinjavanje proizvedenog mulja.

Odlagalište otpada, kao posljednje rješenje za zbrinjavanje otpada, u usporedbi s drugim rješenjima, uvijek je predstavljalo ponor PE. Čak i ako je na odlagalištu prikupljan generirani odlagališni plin i korišten u kogeneracijskom postrojenju s bioplinskim motorom, proizvodilo se manje energije nego kroz druge tehnologije za energetsku oporabu. Iako rezultati pokazuju da bi odlagalište komunalnog otpada sa skupljanjem odlagališnog plina moglo osigurati veći povrat primarne energije od AD u prvom razdoblju, kada se scenariji međusobno usporede,

može se uočiti da je ulazni tok otpada u odlagalište ~ 2,7 puta veći nego ulazni tok u postrojenje za AD.

Kompostiranje kao tehnologija imalo je negativan utjecaj na energetsku održivost svih sustava gospodarenja komunalnim otpadom u kojima je korišteno - koristi se više primarne energije za proizvodnju komposta nego što pomaže smanjiti potrošnju primarne energije zamjenom gnojiva tj. putem izbjegnute proizvodnje istog.

Budući da je utjecaj transporta mali u usporedbi s drugim vrijednostima, utjecaj promjene transportne udaljenosti nije mogao biti jasno prikazan u dijagramu. Vrijednosti u dijagramu izračunane su na bazi transportne udaljenosti od nula kilometara za transport otpada unutar grada te 250 km za međugradski prijevoz. Za transport unutar grada korištena je vrijednost od nula kilometara zbog stvarne situacije gdje su svi objekti za obradu otpada smješteni unutar granica razmatranog sustava. Prethodno određen raspon udaljenosti, tj. utjecaj promjene transportne udaljenosti na rezultate analize prikazan je u Tablica 32.

Tablica 32. Utjecaj promjene transportnih udaljenosti u GJ

	Postojeći sustav		Plan		Materijalna oporaba		Energetska oporaba	
	Srednja	Max	Srednja	Max	Srednja	Max	Srednja	Max
		Min		Min		Min		Min
Danas	1.295	2.330	1.295	2.348	43.291	81.088	4.332	17.864
		259		259		8.658		866
2020	30.910	55.638	30.910	56.055	55.187	102.789	32.882	69.279
		6.182		6.182		11.037		6.576
2030	46.401	83.521	46.401	84.226	74.084	137.637	48.175	99.254
		9.280		9.280		14.817		9.635

Vrijednost iz dijagrama 27. – 30. nalaze se u lijevim stupcima dok su minimalne i maksimalne vrijednosti prikazane u desnim stupcima koji prikazuju razmatrane scenarije. Kao što se može vidjeti, u scenarijima *Materijalna* i *Energetska oporaba* promjene u transportnoj udaljenosti rezultiraju najvećim (apsolutnim) promjenama u rezultatima te utjecajima na potrošnju primarne energije scenarija. Ove promjene su rezultat velikih količina odvojenog otpada koje

je potrebno transportirati, ovo pogotovo vrijedi za međugradski prijevoz – prijevoz u postrojenja za materijalnu oporabu te cementare. Međutim, ove promjene imaju izrazito malen utjecaj na rezultate ukupne utrošene primarne energije s maksimalnim iznosom utjecaja na razini od 0,6%.

Sumirajući rezultate po tehnologijama izračunan je ukupni CED indikator povrata primarne energije (PER), a dobiveni rezultati su prikazani na Slika 33.

	Postojeći sustav	Plan	Materijalna oporaba	Energetska oporaba	Materijalna oporaba s AD
Danas	697,398,061.09	3,353,245,101.69	3,273,120,058.49	3,324,135,163.01	3,809,887,479.43
2020	2,934,350,976.20	4,613,467,837.68	4,800,758,251.45	4,832,026,850.06	5,458,694,155.71
2030	4,553,089,615.45	6,378,013,066.65	6,469,485,835.74	6,573,626,810.61	7,293,362,694.60

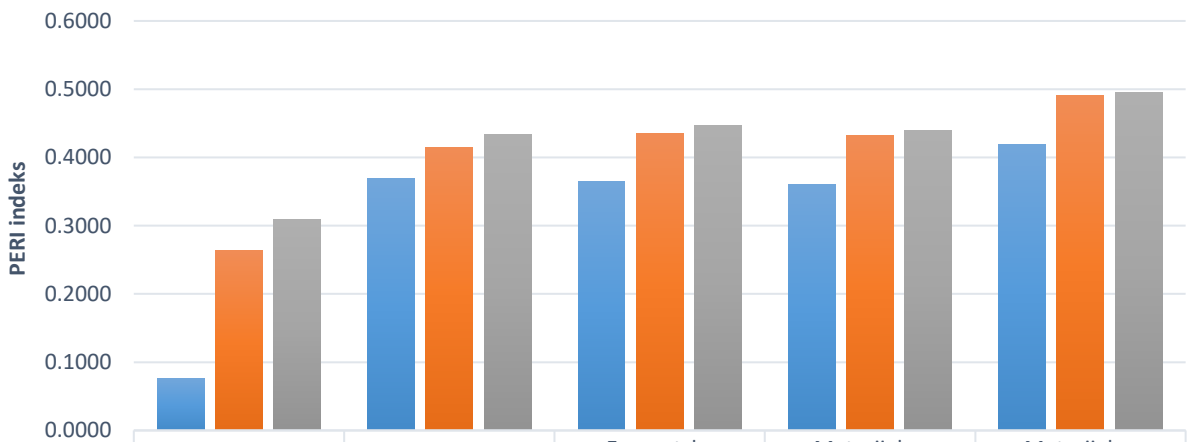
Slika 33. Iznos CED indikatora povrata primarne energije (PER) u MJ

Kao što se može vidjeti, postoji značajna razlika u vrijednosti indikatora povrata primarne energije između scenarija *Postojeći sustav* i ostala tri prethodno navedena, između kojih su razlike vrlo male. Osim toga, iz dijagrama se može vidjeti da su navedeni rezultati za još jedan scenarij. To je scenarij koji je baziran na prethodno izvedenom zaključku da kompostiranje ima negativan utjecaj na energetsku održivost svih sustava gospodarenja komunalnim otpadom u kojima je korišteno. Navedeni scenarij je temeljen na scenariju *Materijalna oporaba* s izmjenom toka biootpada koji se u ovome scenariju odvodi u postrojenje za AD. Svi ostali unutarnji tokovi su isti kao i scenariju *Materijalna oporaba*. Utjecaj izmjena na energetsku

potrošnju te energetsku i materijalnu proizvodnju scenarija *Materijalna oporaba s AD* prikazan je u Prilogu.

Među svim navedenim scenarijima, scenarij *Materijalna oporaba s AD* iskorištava dodatnu energetsku oporabu biootpada, ali i vrednuje digestat kao zamjenu za umjetna gnojiva te time ostvaruje veći povrat primarne energije od ostalih scenarija. Ostala tri alternativna scenarija (*Plan*, *Materijalna oporaba* i *Energetska oporaba*) pokazuju slične vrijednosti povrata primarne energije, između kojih scenarij *Energetska oporaba* ipak pokazuje najveću vrijednost PER faktora.

Na bazi izračunanog povrata primarne energije, korištenjem jednadžbe (13), izračunan je godišnji indeks PERI za analizirana vremenska razdoblja - Slika 34. Za razliku od ostalih izvedenih veličina, ovaj indeks nije moguće izračunati zasebno za sve korištene tehnologije. Dok načela očuvanja mase vrijede, te je ukupni CED ekvivalent ulaznog otpada korišten za izračun indeksa PERI za cjelokupni sustav, sastav svih unutarnjih ulaznih tokova otpada u razmatrane tehnologije nije poznat zbog fizičkih, bioloških i/ili kemijskih promjena pa stoga niti CED ekvivalente svakog toka unutar razmatranog sustava nije moguće izračunati. Ovo se najbolje može ilustrirati primjerom digestorskog mulja iz procesa AD koji se dalje koristi u spalionici otpada.



	Postojeći sustav	Plan	Energetska oporaba	Materijalna oporaba	Materijalna oporaba s AD
Danas	0.0766	0.3685	0.3653	0.3597	0.4187
2020	0.2641	0.4152	0.4349	0.4321	0.4913
2030	0.3095	0.4335	0.4468	0.4397	0.4957

Slika 34. Vrijednost indeksa PERI po scenarijima

Indeks PERI predstavlja udio energije sadržane u skupljenom otpadu (otpadu koji je ušao u razmatrani sustav) koja se ponovno vrati u sustav (u ekonomiju) putem materijalne i energetske oporabe te je time razumljiviji pokazatelj od CED indikatora povrata primarne energije za sustave i proizvode. Također, ovaj indeks je pokazao i neke druge trendove. Dok indeks PERI (za sve scenarije) raste tijekom godina, u prvom razdoblju može se uočiti brži porast, koji je još izraženiji kod scenarija bez integriranog sekundarnog odvajanja otpada.

Ovo povećanje je rezultat primarne separacije otpada i nije nastalo kao rezultat samih promjena u sustavu gospodarenja otpadom, jer to povećanje je također prisutno i u scenariju *Postojeći sustav* koji opisuje situaciju bez ikakvih daljnjih promjena u sustavu. U kasnijim godinama može se uočiti konvergencija indeksa te manje promjene njegovog iznosa s povećanjem primarnog odvajanja, posebno za scenarije koji su pokazali veći potencijal povrata primarne energije. Ta konvergencija se najbolje vidi iz rezultata, gdje maksimalna disperzija rezultata u početku iznosi 0,3526, dok u kasnijim godinama pada na 0,2272 te 0,1862 u 2020 i 2030.

Smanjenje povećanja indeksa energetske održivosti definira određeni maksimum, nakon čega daljnje ulaganje u primarnu separaciju otpada nije više isplativo te je potrebno uvesti konkretnije promjene u sustavu gospodarenja komunalnim otpadom kako bi se mogla dalje povećavati održivost sustava, poput integracije novih tehnologija. To je slučaj sa scenarijem *Materijalna oporaba*, gdje je prirast indeksa PERI između 2020. i 2030. iznosio samo 0,0076.

Prikazani podaci se odnose za varijantu konverzije proizvedenog bioplina u toplinsku i električnu energiju putem kogeneracijskog postrojenja s bioplinskim motorom. Razlike u rezultatima za ostale dvije razmatrane varijante prikazana su u Tablica 33 i Tablica *34*.

Tablica 33. Razlike u iznosu CED indikatora povrata primarne energije (PER) u MJ, za transformacije bioplina u biometan te njegovog injektiranja u mrežu

	Postojeći sustav	**Energetska oporaba**	**Materijalna oporaba s AD**
Danas	-66.316.370,69	-64.334.243,65	-64.334.243,65
2020	-26.581.466,66	-89.267.213,31	-89.267.213,31
2030	-36.529.729,92	-116.152.120,22	-116.152.120,22

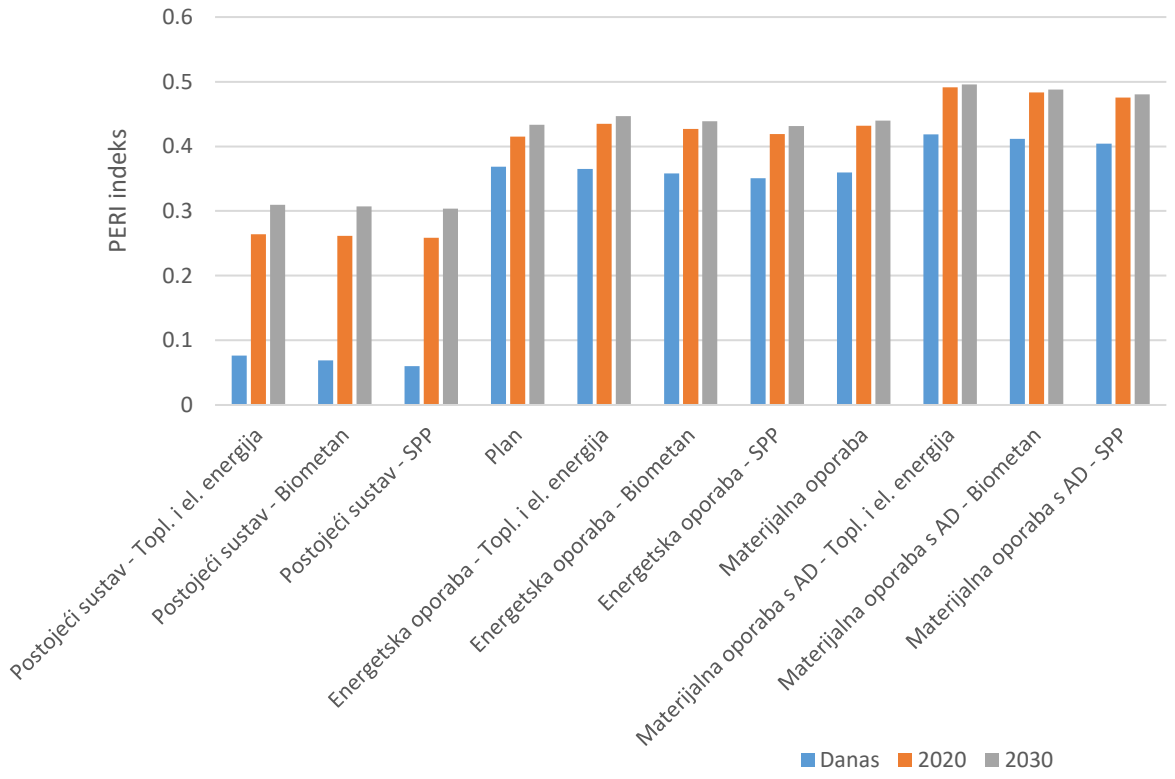
Tablica 34. Razlike u iznosu CED indikatora povrata primarne energije (PER) u MJ, za transformacije bioplina u SPP i korištenja kao zamjensko gorivo

	Postojeći sustav	**Energetska oporaba**	**Materijalna oporaba s AD**
Danas	-146.637.443,28	-132.716.355,32	-132.716.355,32
2020	-60.187.953,56	-176.182.127,92	-176.182.127,92
2030	-83.129.115,08	-225.835.569,47	-225.835.569,47

Navedene razlike su rezultat povećanja energetske potrošnje, većinom u obliku električne energije, zbog dodavanja novih tehnologija u proizvodni lanac, kao i zbog gubitaka nastalih u samom procesu energetske pretvorbe. Osim toga, koriste se i druge CED vrijednosti za vrednovanje konačnog proizvoda koje također imaju utjecaj na konačni rezultat.

Zbog navedenih utjecaja, dolazi do smanjenja povrata energije kod korištenja bioplina u obliku biometana, međutim, smanjenja su na razini 0,8% do 1,5% za pročišćavanje bioplina te njegovu upotrebu u obliku biometana te od 1,8% do 3% za upotrebu biometana u obliku SPP-a. Devijaciju među ovim podacima čini samo rezultat za *Postojeći sustav* te današnje količine skupljenog otpada gdje se ovaj postotak povećava na 9,6% odnosno 23,2% zbog jednostavnosti sustava gospodarenja otpadom, male materijalne oporabe te velike količine proizvedenog bioplina/biometana kojeg je potrebno transformirati, što u ovome scenariju čini jedini način energetske oporabe – ovo je vidljivo iz rezultata masenih i energetskih tokova unutar sustava.

Utjecaj na indeks povrata primarne energije, u usporedbi s prethodno prikazanim rezultatima, je prikazan na Slika 35, dok su vrijednosti indeksa PERI za ove varijante prikazane Tablica 35.



Slika 35. Usporedba vrijednosti indeksa PERI za sve razmatrane scenarije i varijante

Tablica 35. Vrijednosti indeksa PERI za razmatrane varijante pretvorbe bioplina

	Postojeći sustav			**Energ. oporaba**			**Mat. oporaba s AD**		
	Topl. i el. energija	Biometan	SPP	Topl. i el. energija	Biometan	SPP	Topl. i el. energija	Biometan	SPP
Danas	0,0766	0,0688	0,0600	0,3653	0,3582	0,3507	0,4187	0,4116	0,4041
2020	0,2641	0,2617	0,2587	0,4349	0,4269	0,4190	0,4913	0,4833	0,4754
2030	0,3095	0,3070	0,3038	0,4468	0,4389	0,4315	0,4957	0,4878	0,4804

Iz rezultata je vidljivo da transformacije bioplina u biometan i SPP imaju mali, ali negativan utjecaj na udio povrata primarne energije u ekonomske tokove te sa stajališta održivosti bolje rezultate pokazuje direktna transformacije proizvedenog bioplina u električnu i toplinsku energiju.

6.6. Analiza smanjenja utjelovljene energije – Analiza održivosti

Kako bi se napravila analiza održivosti kroz izračun utjelovljene energije proizvedenih materijala, prvo treba analizirati zadovoljavanje energetskih potreba sustava po pojedinim

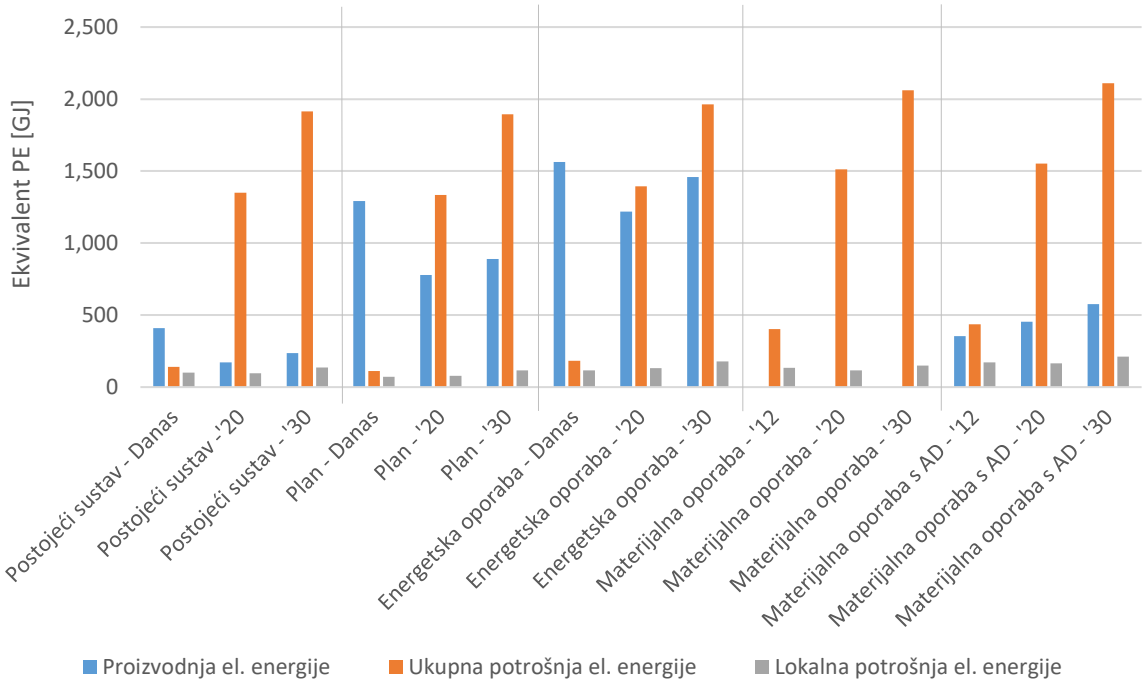
energentima da bi se na bazi tih izračuna mogao analizirati utjecaj identificiranih promjena na održivost dobivenih (polu)proizvoda.

6.6.1. Zadovoljavanje energetskih potreba

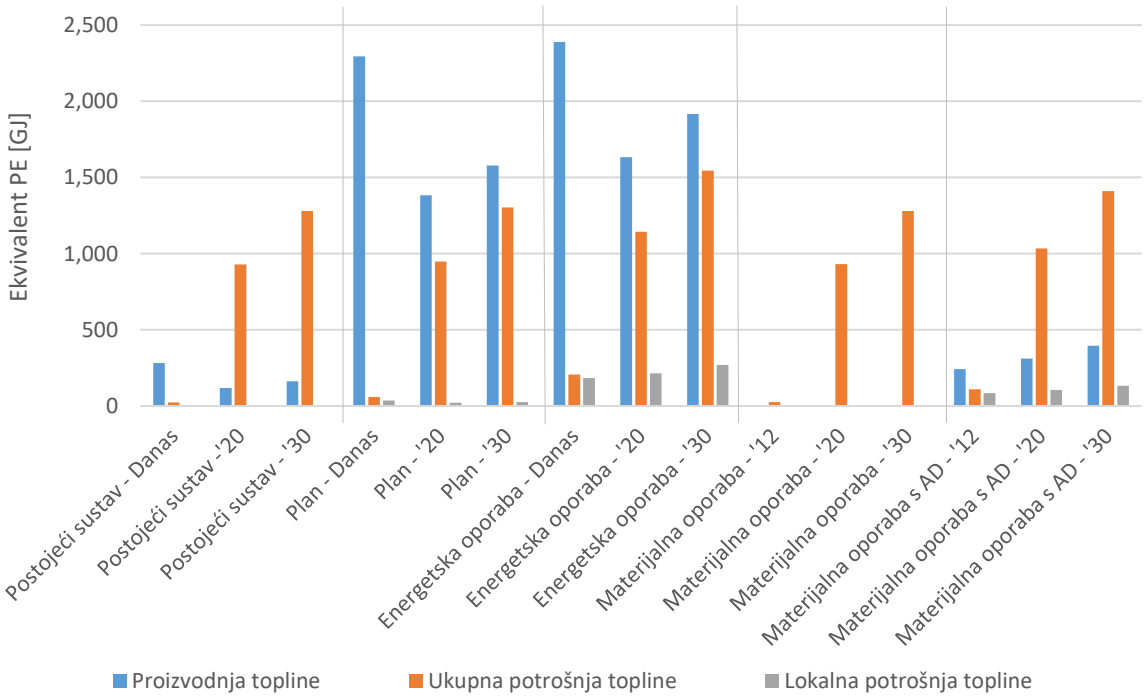
Prethodno prikazani rezultati pokazuju da sustav gospodarenja komunalnim otpadom kroz oporabu otpada može vratiti u gospodarstvo veliku količinu resursa (izraženu o obliku CED indikatora), odnosno do 50% resursa koji su ušli u sustav gospodarenja otpadom u obliku otpadnih materijala (izraženo u obliku PE), što predstavlja veliki dio prethodno odbačenih sirovina čija se gospodarska vrijednost, u nekom obliku, zadržava unutar gospodarstva. Međutim, ovaj pristup ne omogućuje diferencijaciju među pojedinim energetskim tokovima niti kvantificiranje njihovog zasebnog utjecaja.

Zbog prethodno navedenog, u ovome je dijelu praćena potrošnja i proizvodnja svakog energetskog vektora zasebno te je izračunan udio pokrivanja vlastitog energetskog konzuma, putem vlastite energetske proizvodnje, unutar sustava. Za ovo su korišteni rezultati praćenja energetskih tokova, prikazani u poglavlju 6.2 i 6.4.

Treba uzeti u obzir različita stanja istih energetskih vektora u proizvodnji i potrošnji (npr. proizvodnja električne energije je u većini slučajeva na visokonaponskoj razini, dok je potrošnja na srednjoj i/ili niskonaponskoj razini). Da bi se uključili gubici transformacija i distribucije u izračun, potrošnja i proizvodnja energetskih vektora "na vratima" svake od razmatranih tehnologija preračunane su u ekvivalente primarne energije i praćene odvojeno. Sumirani ekvivalenti primarne energije pojedinih energetskih vektora u potrošnji i proizvodnji su prikazani na Slika 36 – Slika 43.



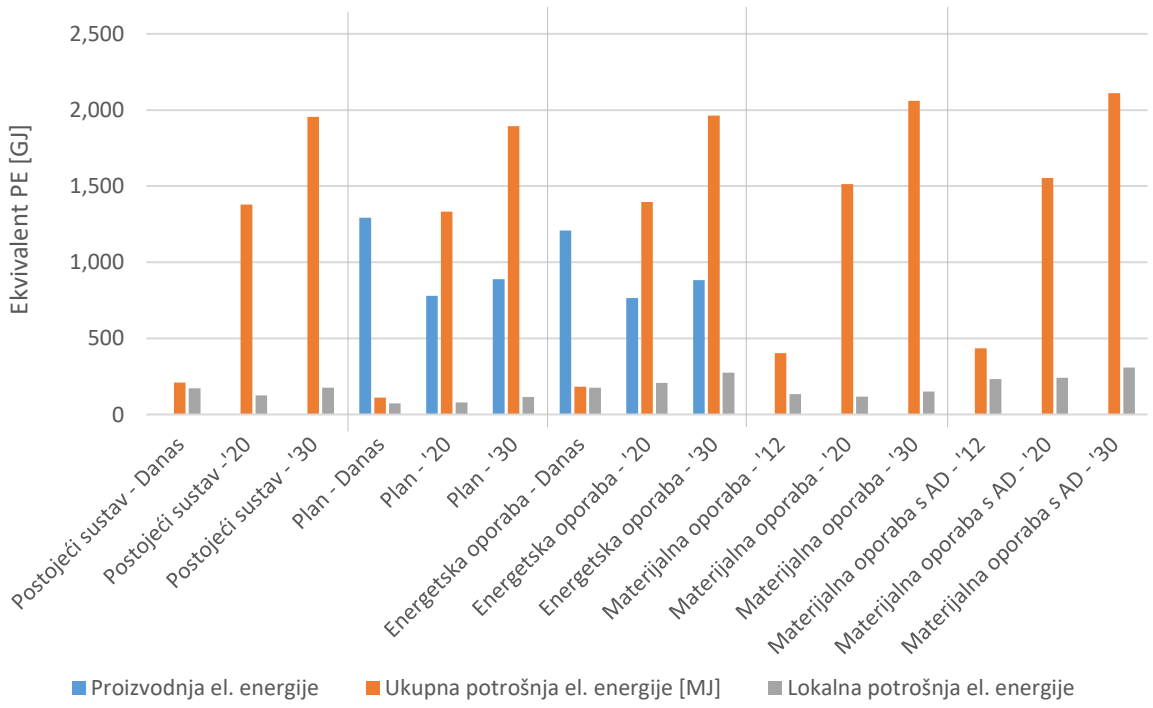
Slika 36. Proizvodnja i potrošnja električne energije za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju



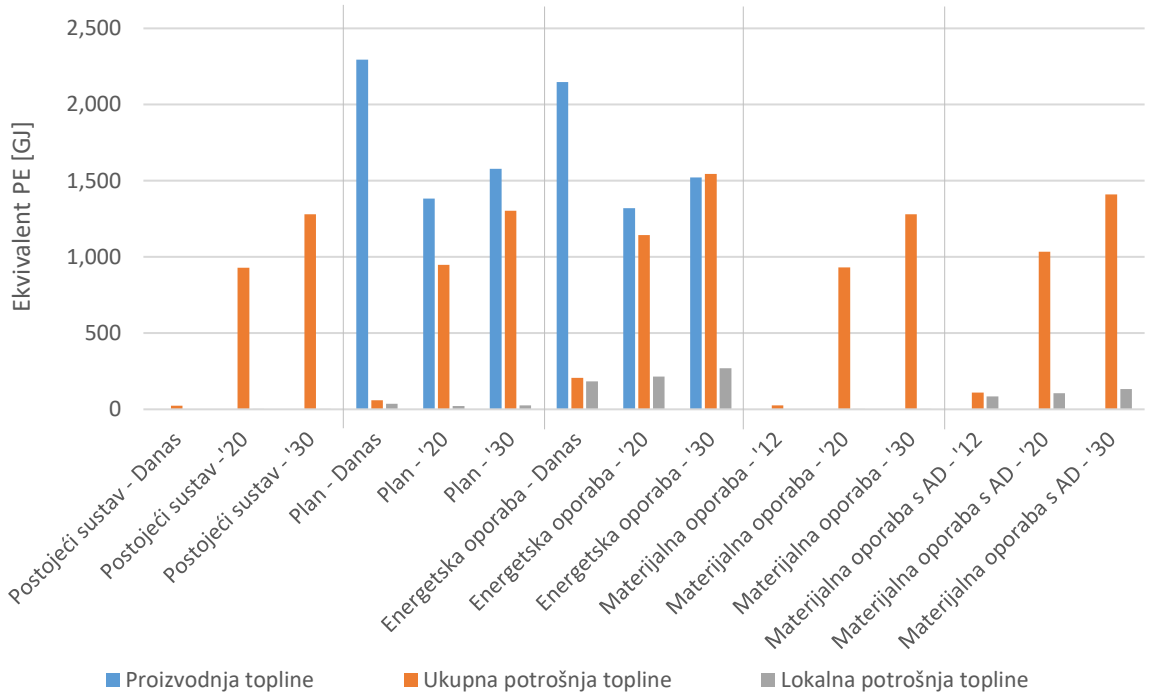
Slika 37 Proizvodnja i potrošnja toplinske energije za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju

Kao što se može vidjeti na Slika 36 i Slika 37, energetska oporaba otpada putem kogeneracije električne i toplinske energije lako može u potpunosti pokriti lokalne energetske potrebe (za električnom i toplinskom energijom) sustava za gospodarenje i oporabu komunalnog otpada. Kada se uzme u obzir šira slika, te razmotri ukupna potrošnja sustava, energetska proizvodnja pokriva potražnju samo u slučaju današnjeg vremenskog okvira koji uzima u obzir postojeće količine skupljenog otpada, izuzev scenarija *Materijalna oporaba* i *Materijalna oporaba s AD* gdje je energetska proizvodnja nepostojeća ili mala, a energetski zahtjevi veći zbog naglaska na materijalnoj oporabi te s time i složenog sustava gospodarenja otpadom. U 2020. i 2030. potrošnja električne energije se drastično povećava kroz sve scenarije, tako da jedino scenariji s najvećom energetskom oporabom prelaze 50% zadovoljavanja energetskih potreba proizvodnjom. U scenariju *Plan* zadovoljeno je oko 50% dok se u scenariju *Energetska oporaba* zadovoljava oko 80% energetskih potreba (za periode 2020./2030.).

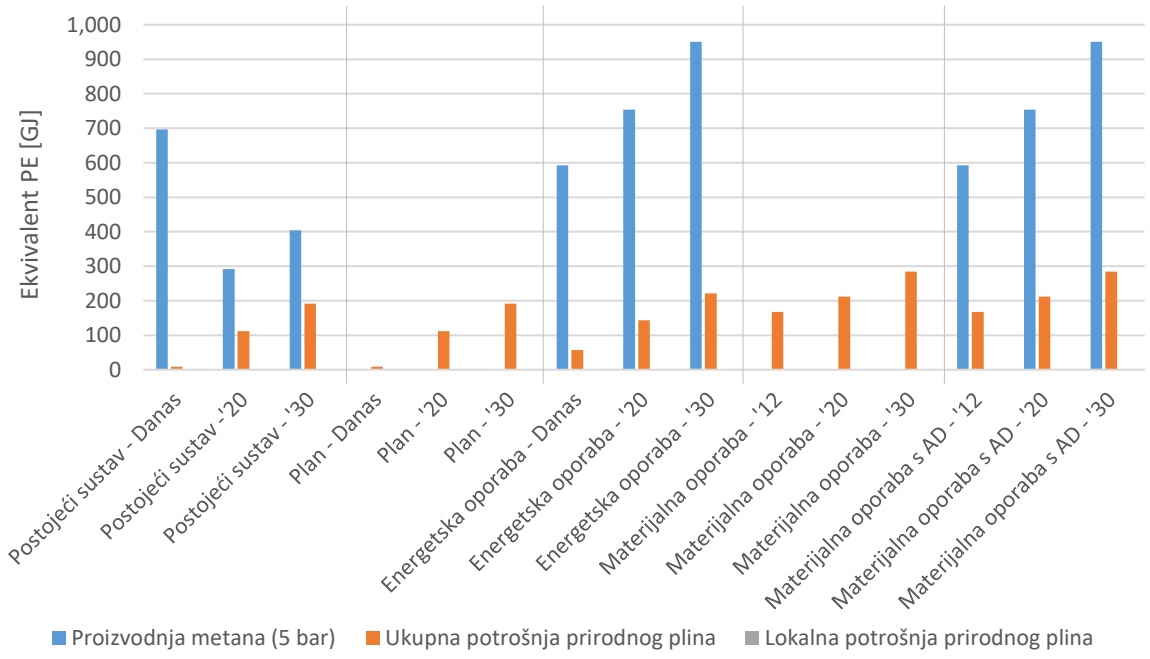
Rezultati za varijante naknadne konverzije proizvedenog bioplina i odlagališnog plina u biometan (koji se injektira u javnu plinsku mrežu) te u SPP za pogon motornih vozila (koji se u ovome slučaju razmatra kao zamjensko gorivo za kamione s dizelskim motorom) prikazani su na Slika 38 – Slika *43*.



Slika 38. Proizvodnja i potrošnja električne energije za varijantu transformacije bioplina u biometan



Slika 39. Proizvodnja i potrošnja toplinske energije za varijantu transformacije bioplina u biometan

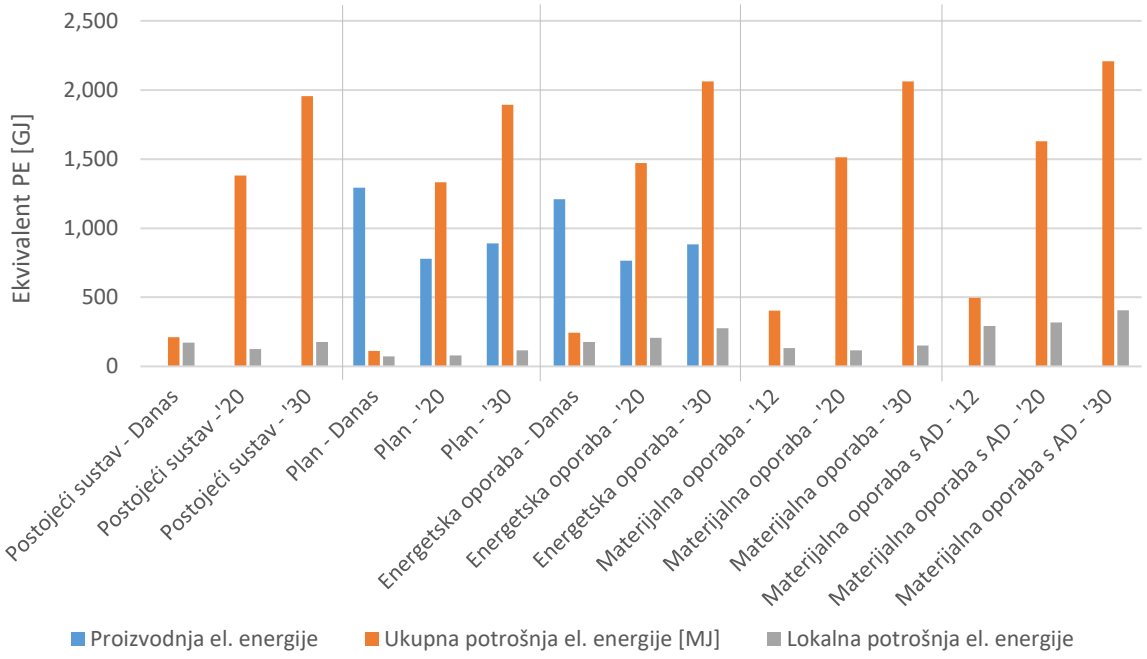


Slika 40 Proizvodnja i potrošnja metana za varijantu transformacije bioplina u biometan

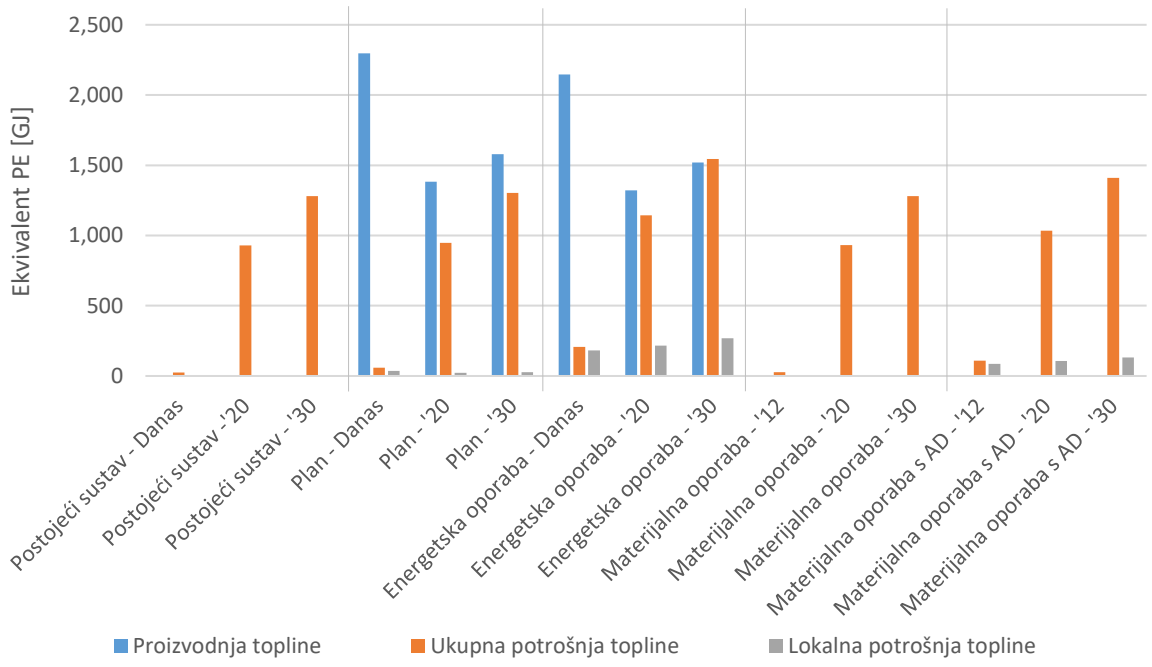
Konverzijom (nadogradnjom (*engl. upgrade*)) bioplina u biometan i ubrizgavanjem u plinsku mrežu (Slika 38 – Slika *40*), proizvodnja topline i električne energije se smanjuje u svim

scenarijima s proizvodnjom bioplina i odlagališnog plina te u svim razmatranim vremenskim okvirima. Scenariji s TOO, i bez proizvodnje iz bioplina, još uvijek u potpunosti proizvodnjom pokrivaju toplinski konzum dok je električni konzum pokriven na razini od oko 50% (za 2020/2030). Izuzetak su scenariji *Postojeći sustav* i *Materijalna oporaba s AD* gdje više nema proizvodnje toplinske i električne energije. Na račun smanjenja kogeneracijske proizvodnje električne i toplinske energije, proizvodnja biometana ispunjava sve zahtjeve sustava za prirodnim plinom. Ostatak biometana, kojega razmatrani sustav ne konzumira, može se koristiti za pokrivanje opće potrošnje za prirodnim plinom. Istovremeno, uvođenjem tehnologija za konverziju bioplina u biometan, povećala se potrošnja električne energije u razmatranim scenarijima.

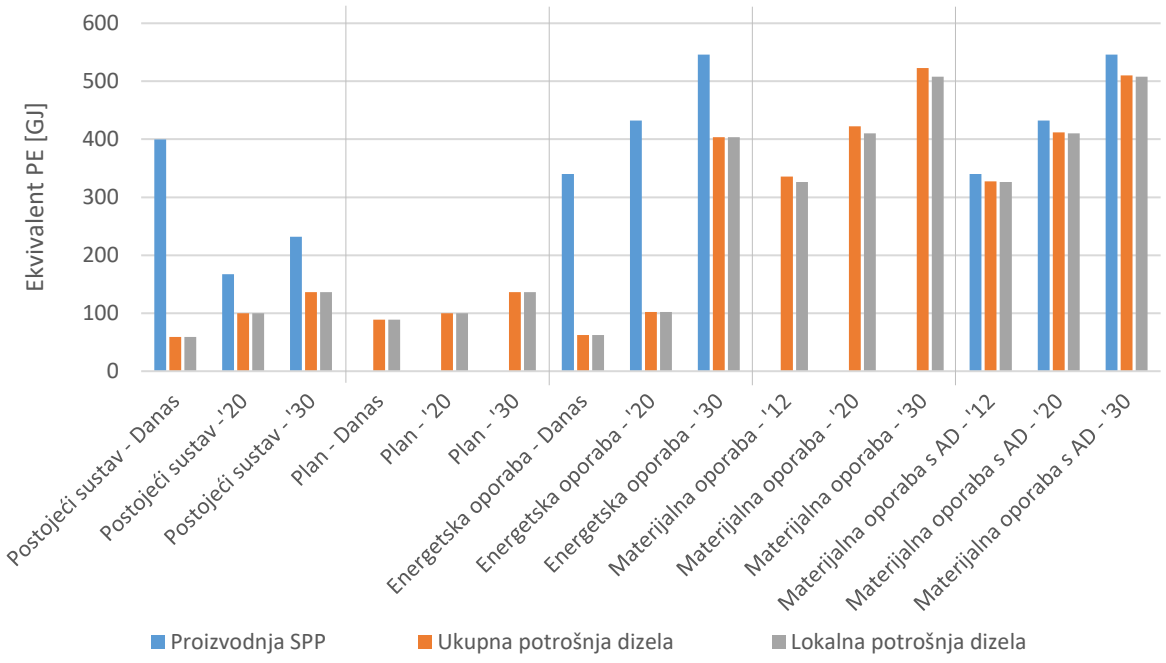
Rezultati energetske potrošnje i proizvodnje za pojedine varijante, koje uključuje daljnju transformaciju (tj. kompresiju) biometana u SPP za pogon motornih vozila, prikazani su Slika 31 – Slika *43*.



Slika 41. Proizvodnja i potrošnja električne energije za varijantu transformacije bioplina u SPP



Slika 42. Proizvodnja i potrošnja toplinske energije za varijantu transformacije bioplina u SPP



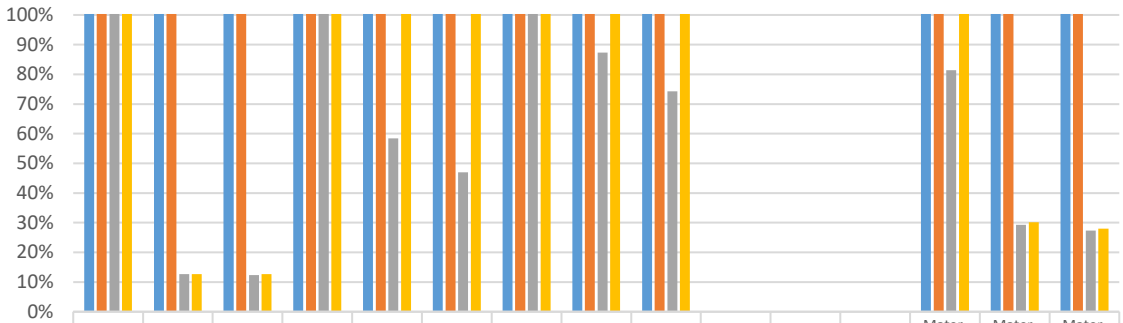
Slika 43. Proizvodnja i potrošnja goriva za varijantu transformacije bioplina u SPP

Komprimiranjem prethodno proizvedenog biometana na 200 bar, biometan se (u obliku SPP-a) može koristiti kao gorivo za pogon kamiona za prikupljanje otpada kao i za pogon transportne flote. U ovome slučaju, kao što se može vidjeti, potrošnja i proizvodnja toplinske energije su

isti kao u prethodnom slučaju, dok je potrošnja električne energije samo malo porasla zbog potrošnje postrojenja za komprimiranje biometana.

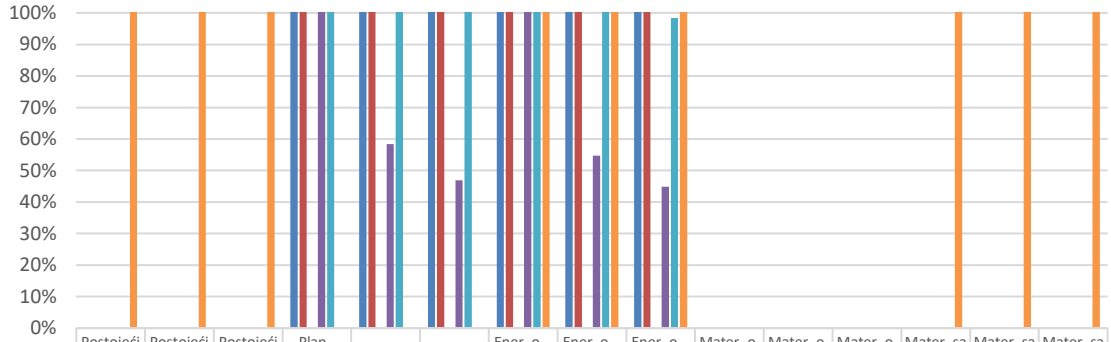
U svim scenarijima i vremenskim okvirima proizvodnja SPP-a iz biometana omogućava potpun prijelaz flote za skupljanja i transport otpada na alternativno gorivo (SPP). U ovom slučaju ukupna potrošnja goriva jednaka je lokalnoj jer se pretpostavlja da se svi kamioni pune gorivom u gradu koji je i izvor predmetnog komunalnog otpada. Biometan koji nije potrošen unutar sustava mogao bi se koristiti za pokrivanje potreba drugih komunalnih službi kao i općih potreba za SPP-om.

Faktori pokrivanja, izračunani iz gore prikazanih podataka o potrošnji i proizvodnji pojedinih energetskih vektora, prikazani su dijagramima i tablicama na Slika 44 – Slika *48*.



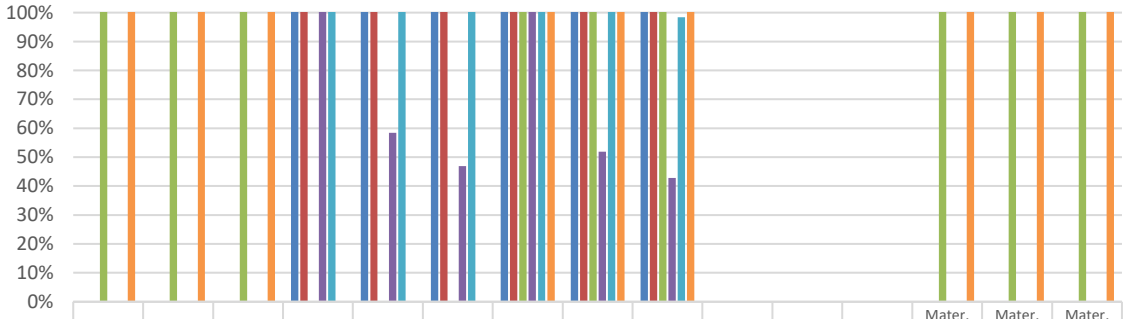
	Postojeći - Danas	Postojeći -'20	Postojeći - '30	Plan - Danas	Plan - '20	Plan - '30	Ener. op. - Danas	Ener. op. - '20	Ener. op. - '30	Mater. op. - '12	Mater. op. - '20	Mater. op. - '30	Mater. op. s AD - '12	Mater. op. s AD - '20	Mater. op. s AD - '30
Lokalna el. en.	406%	177%	174%	1782%	980%	769%	1342%	931%	813%	0%	0%	0%	205%	274%	272%
Lokalna toplina	19661%	4313%	4424%	6200%	6403%	5945%	1310%	758%	712%	0%	0%	0%	285%	293%	297%
Ukupna el. en.	293%	13%	12%	1159%	58%	47%	857%	87%	74%	0%	0%	0%	81%	29%	27%
Ukupna toplina	1168%	13%	13%	3845%	146%	121%	1157%	143%	124%	0%	0%	0%	222%	30%	28%

Slika 44. Faktori pokrivanja potrošnje energetskih vektora za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju



	Postojeći - Danas	Postojeći -'20	Postojeći - '30	Plan - Danas	Plan - '20	Plan - '30	Ener. o. - Danas	Ener. o. - '20	Ener. o. - '30	Mater. o. - '12	Mater. o. - '20	Mater. o. - '30	Mater. sa AD - '12	Mater. sa AD - '20	Mater. sa AD- '30
Lokalna el. en.	0%	0%	0%	1782%	980%	769%	686%	369%	321%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lokalna toplina	0%	0%	0%	6200%	6403%	5945%	1177%	613%	565%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lokalna prir. plin	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ukupna el. en.	0%	0%	0%	1159%	58%	47%	663%	55%	45%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ukupna toplina	0%	0%	0%	3845%	146%	121%	1040%	116%	98%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ukupna prir. plin	7844%	260%	211%	0%	0%	0%	1045%	525%	431%	0%	0%	0%	355%	355%	334%

Slika 45. Faktori pokrivanja potrošnje energetskih vektora za varijantu transformacije bioplina u biometan

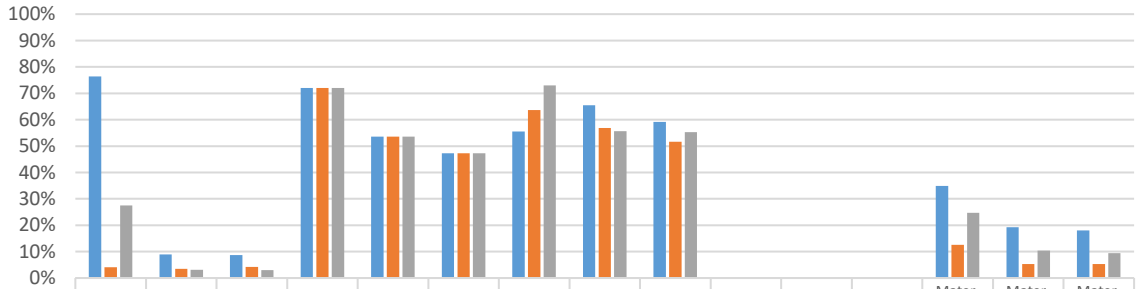


	Postojeći - Danas	Postojeći -'20	Postojeći - '30	Plan - Danas	Plan - '20	Plan - '30	Ener. o. - Danas	Ener. o. - '20	Ener. o. - '30	Mater. o. - '12	Mater. o. - '20	Mater. o. - '30	Mater. sa AD - '12	Mater. sa AD - '20	Mater. sa AD- '30
Lokalna el. en.	0%	0%	0%	1782%	980%	769%	683%	368%	319%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lokalna toplina	0%	0%	0%	6200%	6403%	5945%	1177%	613%	565%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lokalna diezel	674%	167%	170%	0%	0%	0%	546%	424%	135%	0%	0%	0%	104%	105%	107%
Ukupna el. e.	0%	0%	0%	1159%	58%	47%	498%	52%	43%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ukupna toplina	0%	0%	0%	3845%	146%	121%	1040%	116%	98%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ukupna dizel	674%	167%	170%	0%	0%	0%	546%	424%	135%	0%	0%	0%	104%	105%	107%

Slika 46. Faktori pokrivanja potrošnje energetskih vektora za varijantu transformacije bioplina u SPP

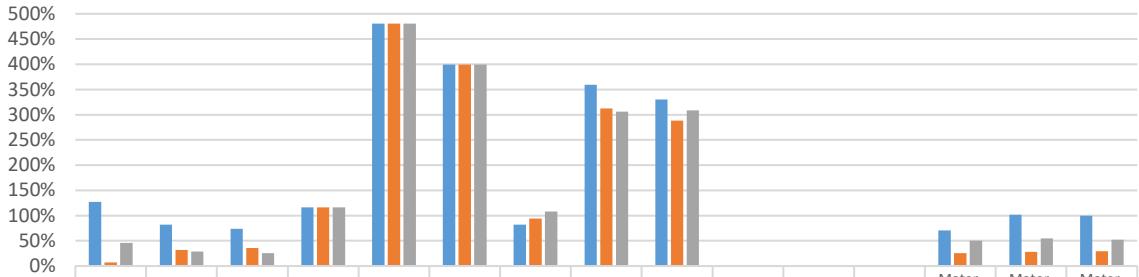
Prikazani faktori pokrivanja daju jasnu sliku o odnosima energetske proizvodnje i potražnje na razini sustava po svakom energetskom vektoru čija je proizvodnja razmatrana. Navedeni rezultati omogućavaju izračun utjecaja ponovnog korištenja proizvedenih energetskih vektora, za pokrivanje energetskih potreba sustava gospodarenja i oporabe komunalnog otpada, na utjelovljenu energiju proizvedenih sekundarnih materijala – čiji su rezultati, kao i njihova diskusija, dani u poglavlju 6.2.2.

Usporedba ukupnih odnosa proizvodnje i potrošnje na razini PE, na razini sustava i lokalnoj razini, prikazane su na Slika 47. i Slika *48*.



	Postojeći - Danas	Postojeći -'20	Postojeći - '30	Plan - Danas	Plan - '20	Plan - '30	Ener. op. - Danas	Ener. op. - '20	Ener. op. - '30	Mater. op. - '12	Mater. op. - '20	Mater. op. - '30	Mater. op. s AD - '12	Mater. op. s AD - '20	Mater. op. s AD - '30
Kogeneracija	76%	9%	9%	72%	54%	47%	56%	65%	59%	0%	0%	0%	35%	19%	18%
Biometan	4%	3%	4%	72%	54%	47%	64%	57%	52%	0%	0%	0%	13%	5%	5%
SPP	28%	3%	3%	72%	54%	47%	73%	56%	55%	0%	0%	0%	25%	10%	9%

Slika 47. Usporedba ukupnih odnosa proizvodnje i potrošnje na razini primarne energije po varijantama – razina sustava



	Postojeći - Danas	Postojeći -'20	Postojeći - '30	Plan - Danas	Plan - '20	Plan - '30	Ener. op. - Danas	Ener. op. - '20	Ener. op. - '30	Mater. op. - '12	Mater. op. - '20	Mater. op. - '30	Mater. op. s AD - '12	Mater. op. s AD - '20	Mater. op. s AD - '30
Kogeneracija	127%	82%	74%	116%	481%	399%	82%	359%	330%	0%	0%	0%	71%	102%	100%
Biometan	7%	32%	35%	116%	481%	399%	94%	312%	288%	0%	0%	0%	25%	28%	29%
SPP	46%	28%	25%	116%	481%	399%	108%	306%	308%	0%	0%	0%	50%	55%	52%

Slika 48. Usporedba ukupnih odnosa proizvodnje i potrošnje na razini primarne energije po varijantama – lokalna razina

Prikazane usporedbe (Slika 47. i Slika *48*) prikazuju ukupne faktore pokrivanja potrošnje analiziranih sustava njihovom vlastitom proizvodnjom energije. Ovi faktori ne uzimaju u obzir zadovoljavanje potreba za pojedinim energetskim vektorom, nego daju širu sliku odnosa potrošnje i proizvodnje unutar sustava.

Rezultati pokazuju da u najgorem slučaju 7% lokalnih energetskih potreba stvarnog sustava (scenarij *Postojeći sustav*) može biti zadovoljeno kroz energetsku oporabu otpada i to u današnjem vremenskom razdoblju kada se proizvedeni bioplin transformira u biometan, a lokalne potrebe sustava za prirodnim plinom su vrlo male. U scenariju *Plan*, faktori pokrivanja

energetskih potreba jednaki su po varijantama zbog nulte proizvodnje energije iz bioplina te se zadovoljava minimalno 47% ukupnih potreba sustava, dok proizvodnja energije premašuje lokalne potrebe. U scenariju *Energetska oporaba*, u svim varijantama i vremenskim razdobljima, zadovoljava se preko 50% ukupnih energetskih potreba, pri čemu se proizvodi više energije od lokalnih potreba. Za scenarij *Materijalna oporaba*, rezultati su na razini nulte vrijednosti jer navedeni scenarij ne obuhvaća tehnologije čiji je proizvod energetski vektor. Što se tiče proširenog scenarija materijalne oporabe, *Materijalna oporaba s AD*, energetska proizvodnja pokriva do 35% ukupnih potreba sustava, što se na lokalnoj razini diže do 102%, tj. situacije da proizvodnja na razini primarne energije premašuje potrošnju sustava.

6.6.2. Analiza utjecaja na utjelovljenu energiju

Dok je utjelovljena energija primarnih materijala preuzeta iz CED podataka za predmetne materijale, izračun utjelovljene energije sekundarnih materijala napravljen je na bazi izračunanih (i prethodno prikazanih) podataka o energetskoj i materijalnoj potrošnji te proizvodnji, koristeći jednadžbu (14).

Sekundarni materijali imaju nižu vrijednost utjelovljene energije u usporedbi s primarnim materijalima zbog korištenja već formiranih materijala (otpadnih materijala) kao ulaznih sirovina. Na taj način se izbacuje faza ekstrakcije prirodnih sirovina, skraćuje proizvodni lanac te smanjuje potrošnja energije kao i stvaranje otpada tijekom procesa prerade/proizvodnje. Te razlike imaju značajan utjecaj na smanjenje svih triju faktora u jednadžbi (14). Usporedba utjelovljenih energija sekundarnih (za postojeću situaciju) i primarnih materijala prikazana je u Tablica 36.

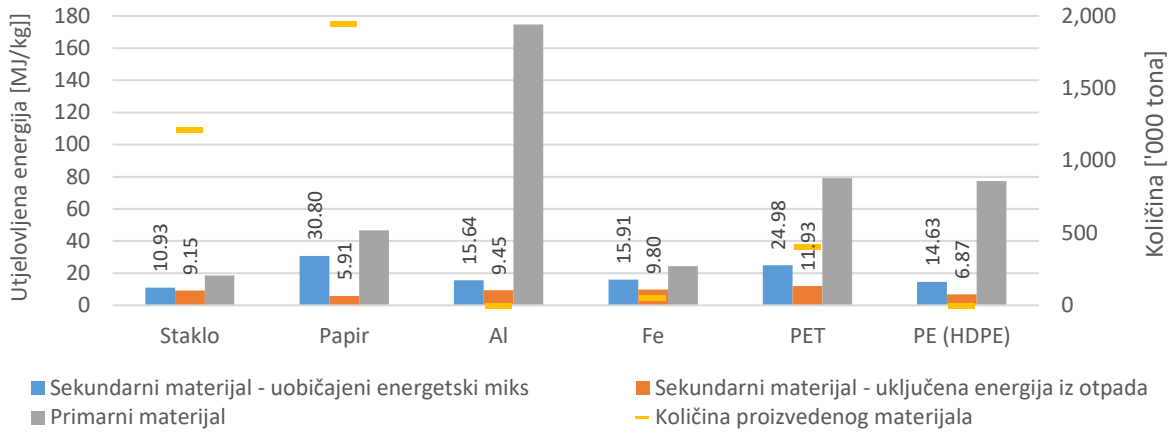
Tablica 36. Utjelovljene energije materijala

	Ukupna utjelovljena energija [MJ/kg]	
Materijal	Sekundarni materijal	Primarni materijal
Staklo	10,93	18,64
Papir	30,80	46,66
Al	15,64	174,74
Fe	15,91	24,44
PET	24,98	79,09
HDPE	14,63	77,28

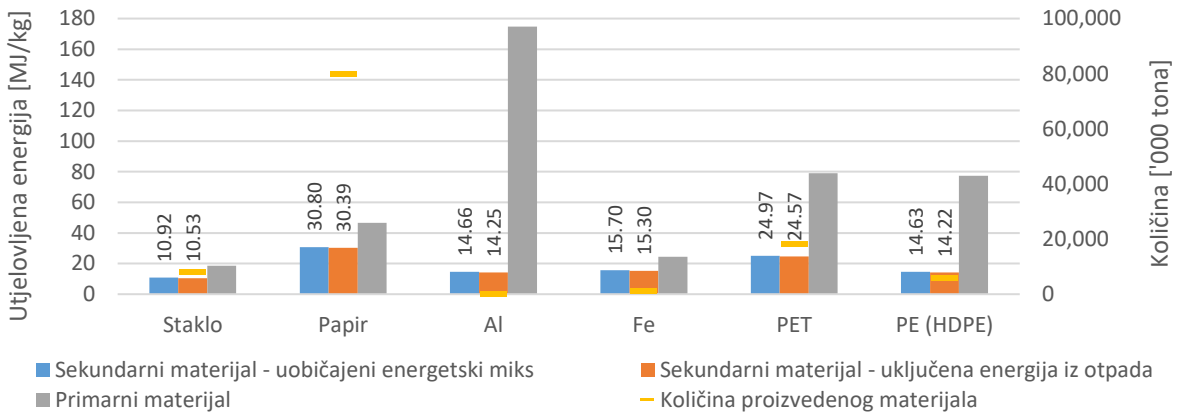
Ova se razlika generira samo putem materijalne oporabe materijala iz odvojenog komunalnog otpada, dok je sustav gospodarenja i separacije otpada kao i materijalne oporabe pogonjen energentima s uobičajenim energetskim miksom za razmatranu lokaciju. Kada se u razmatrani sustav integrira proizvodnja energije iz otpada, koja (djelomično) pokriva potrebe sustava gospodarenja otpadom i njegove oporabe za pojedinim energentima, dolazi do promjena u energetskoj intenzivnosti analiziranog sustava koje se moraju uzeti u obzir pri izračunima.

U sklopu ovog istraživanja izračunan je potencijal dodatnog smanjenja utjelovljene energije korištenjem oporabljene energije iz otpada u proizvodnji recikliranih materijala. To se postiže smanjenjem potrošnje primarnih energenata u lancu materijalne oporabe otpada zbog korištenja energenata proizvedenih iz otpada, tj. oduzimanjem proizvedene energije putem tehnologija za energetsku oporabu otpada (Tablica 28 – Tablica 31) od potrošnje ukupnog sustava (Tablica 13 – Tablica 24), po pojedinim energetskim vektorima. Na ovaj se način prvi faktor u jednadžbi (14) dodatno smanjuje što rezultira u ukupnim smanjenjem utjelovljene energije recikliranog materijala. Ova analiza je provedena za sve razmatrane scenarije i varijante pri čemu su praćena smanjenja potrošnje samo onih energetskih vektora koji se proizvode u razmatranom scenariju/varijanti.

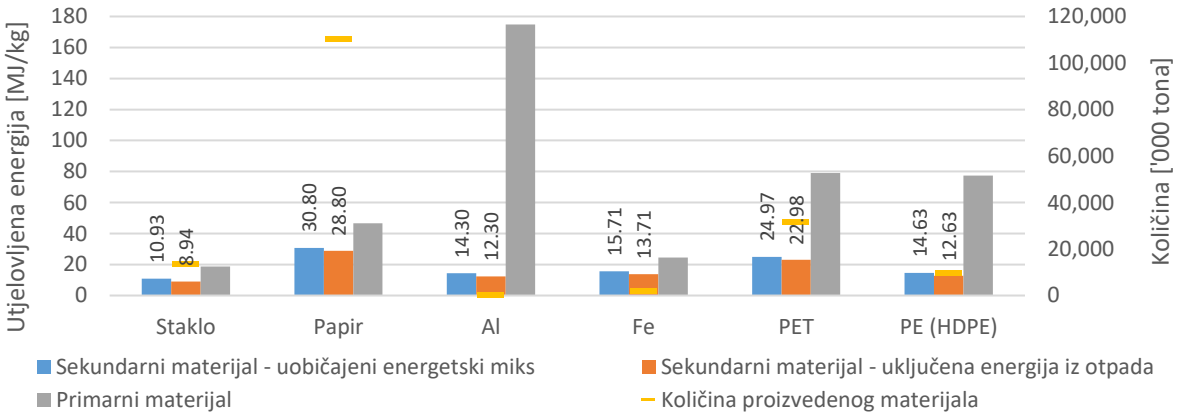
Budući da su svi izračuni rađeni na razini primarne energije, utjecaji energetskih pretvorbi i transporta/prijenosa sirovina i energenata su uračunani. Utjelovljena energija recikliranog materijala u scenariju *Postojeći sustav*, čija je proizvodnja (djelomično) pogonjena oporabljenom energijom, prikazana je na Slika 49 – Slika 51. Podaci su prikazani zajedno s podacima o utjelovljenoj energiji za primarni i reciklirani materijal u čijoj su proizvodnji korišteni energenti s uobičajenim lokalnim energetskim miksom. Uz navedene podatke dane su i oznake koje označavaju proizvedene količine pojedinih recikliranih materijala.



Slika 49. Utjelovljena energija u materijalima – Postojeći sustav (Danas)



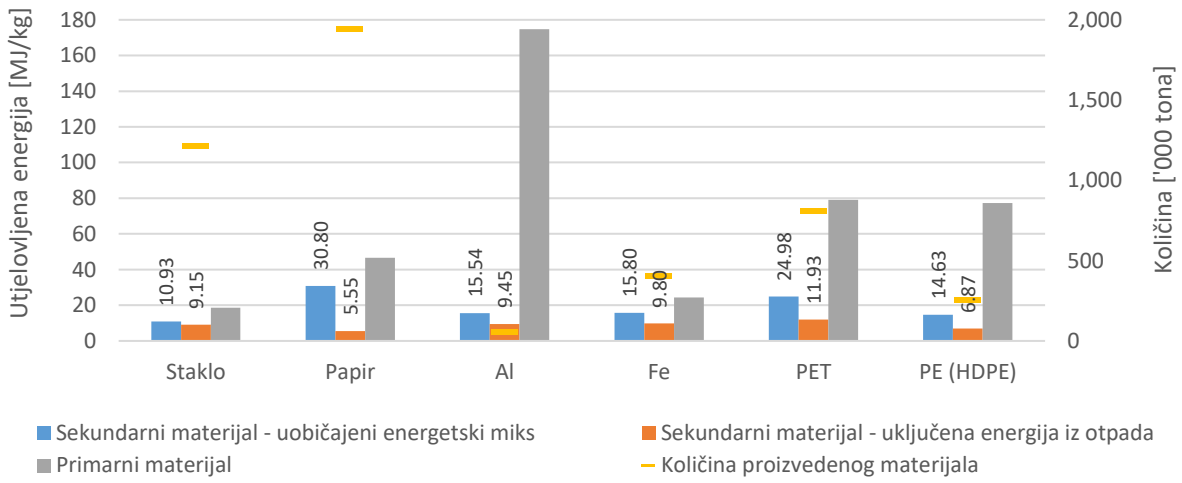
Slika 50. Utjelovljena energija u materijalima – Postojeći sustav (2020)



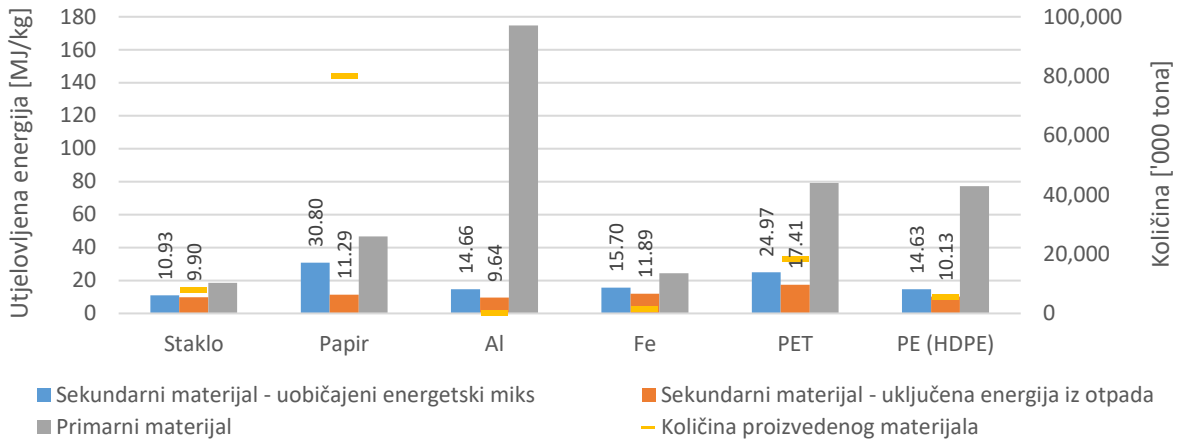
Slika 51. Utjelovljena energija u materijalima – Postojeći sustav (2030)

Uporaba oporabljene energije rezultira dodatnim smanjenjem utjelovljene energije proizvedenih sekundarnih materijala. U trenutačnoj situaciji (*Postojeći sustav (Danas)* - Slika 49, kao i *Plan (Danas)* - Slika 52 te *Energetska oporaba (Danas)* - Slika 55), proizvedeni

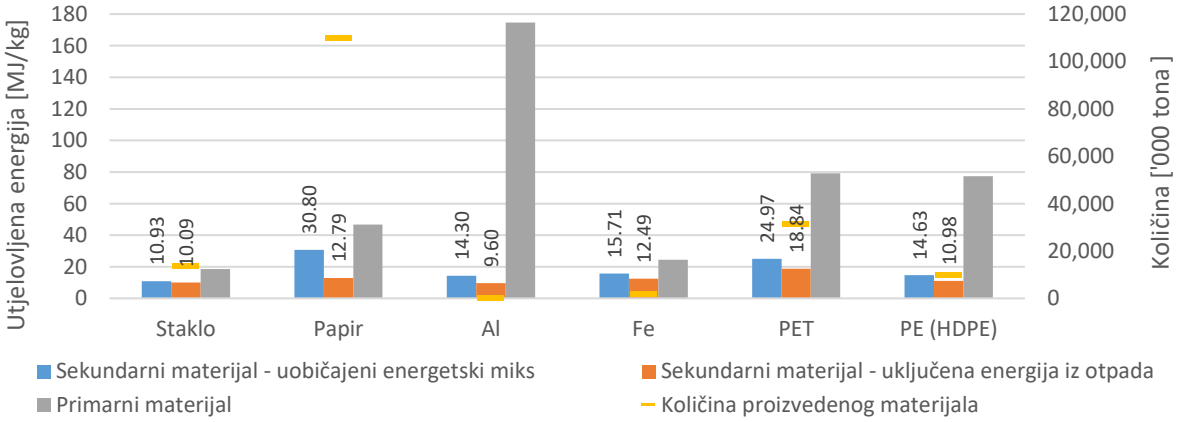
energenti samo su djelomično konzumirani od strane analiziranog sustava te su pokriveni ukupni zahtjevi za električnom i toplinskom energijom. Glavni razlog za to je vrlo niska količina odvojenih otpadnih materijala koji ulaze u lanac recikliranja i time vrlo niska proizvodnja sekundarnih materijala (što se može vidjeti na sekundarnoj osi prikazanih dijagrama). Ovo je slučaj i kod scenarija *Materijalna oporaba s AD* (kod vremenskog okvira analize Danas – Slika 61) gdje, iako je proizvedena relativno mala količina energije, dolazi do pokrivanja ukupnih potreba za toplinskom energijom te većine potreba za električnom energijom na godišnjoj razini. Budući da se s godinama količine prikupljenih otpadnih materijala povećavaju, povećavaju se i energetske potrebe tehnologija za separiranje i materijalnu oporabu, stoga tek rezultati za 2020. i 2030. godinu pokazuju pravi utjecaj korištenja energije oporabljene iz otpada za pokrivanje energetskih potreba razmatranog sustava.



Slika 52. Utjelovljena energija u materijalima – Plan (Danas)



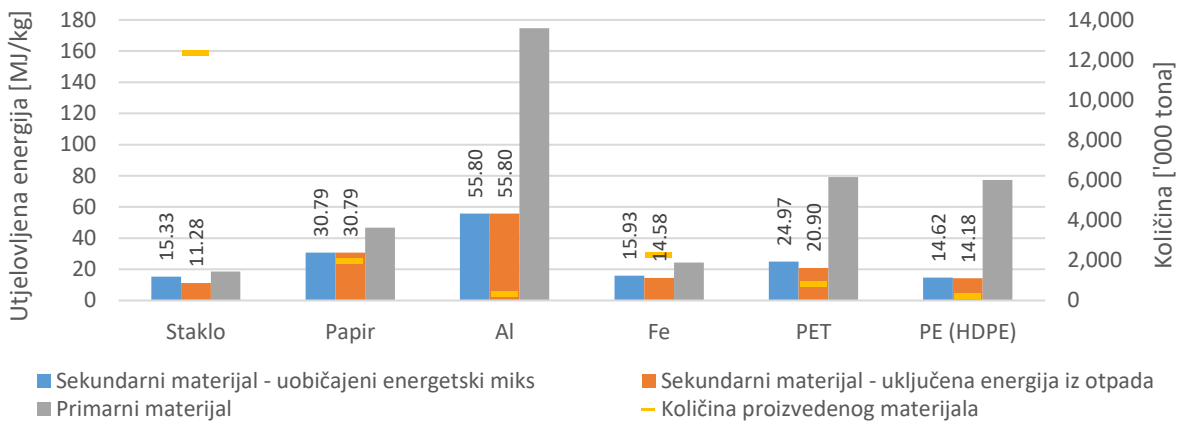
Slika 53. Utjelovljena energija u materijalima – Plan (2020)



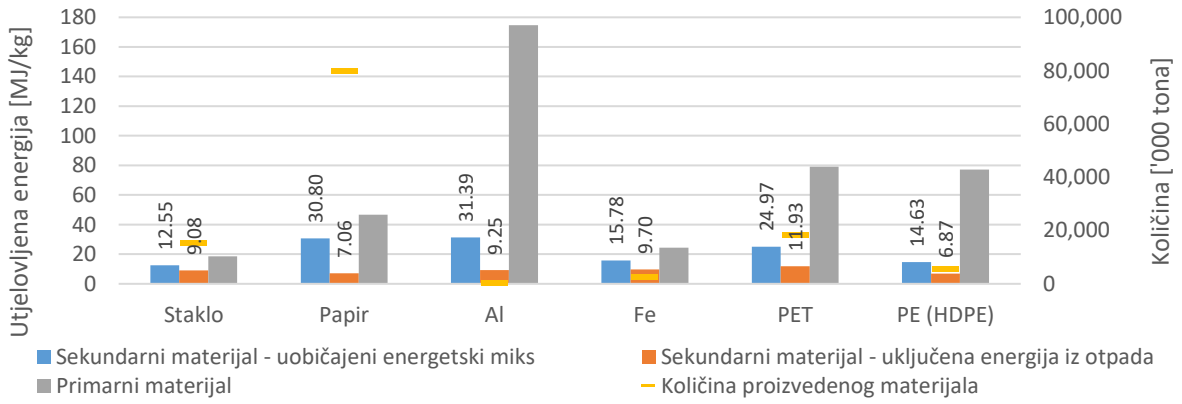
Slika 54. Utjelovljena energija u materijalima – Plan (2030)

Usporedbom rezultata utjelovljene energije za svaku pojedinu grupu materijala, kroz sve scenarije, može se primijetiti da povećanjem energetske oporabe dolazi do većeg smanjenje (u apsolutnoj vrijednosti) utjelovljene energije proizvedenih materijala. Nasuprot tome, uspoređujući rezultate za analizirane vremenske periode (Danas, 2020. i 2030.) može se vidjeti da se povećanjem materijalne oporabe može očekivati manja redukcija (u apsolutnoj vrijednosti) utjelovljene energije proizvedenih materijala. Ovo ponašanje je u skladu s korištenom metodologijom.

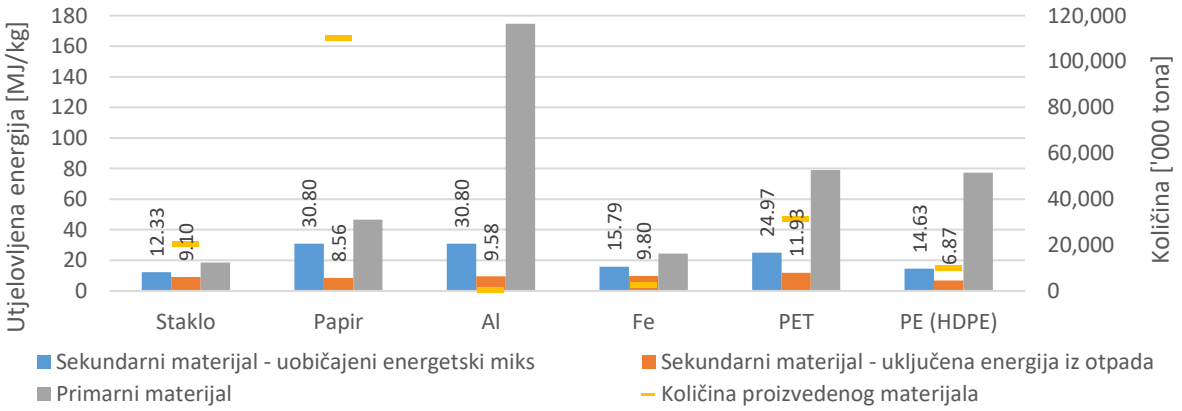
Razlika u utjelovljenim energijama nekih sekundarnih materijala proizvedenih uz uobičajeni energetski miks uočena je između scenarija. To je zbog različitosti u sustavima odvajanja stakla i metala u različitim scenarijima (s ili bez MBO te separacije iz proizvedenog pepela) te time i različite potrošnje primarne energije. Ostali materijali ne prolaze kroz različite tehnologije sekundarne separacije te stoga kod njih nisu uočene razlike između scenarija.



Slika 55. Utjelovljena energija u materijalima – Energetska oporaba (Danas)



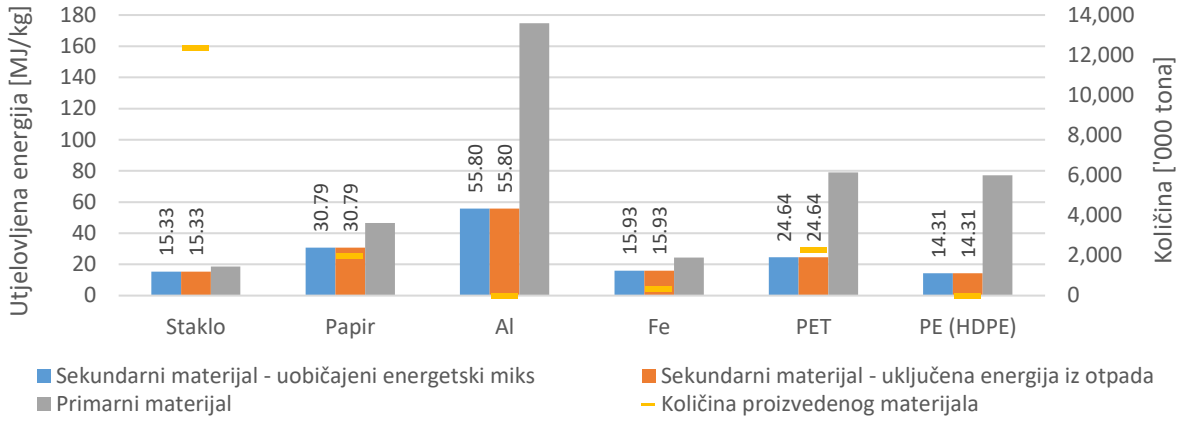
Slika 56. Utjelovljena energija u materijalima – Energetska oporaba (2020)



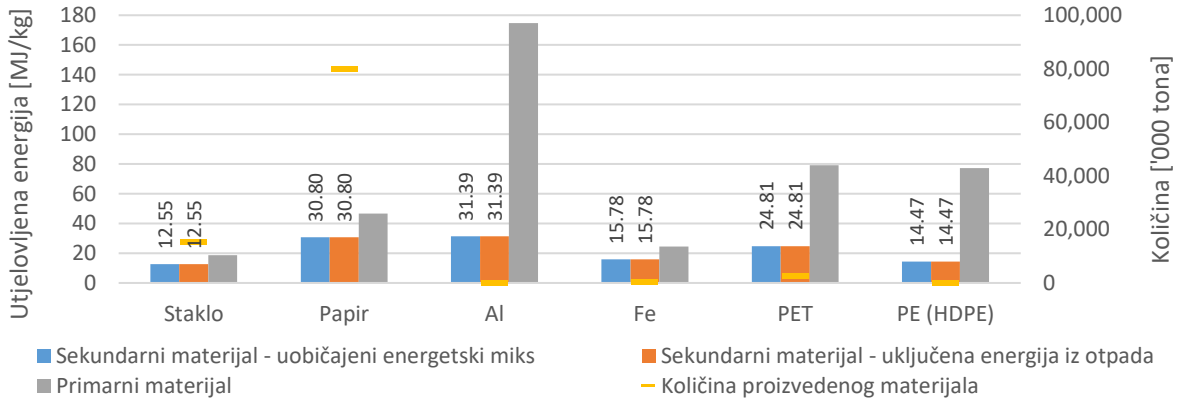
Slika 57. Utjelovljena energija u materijalima – Energetska oporaba (2030)

U odnosu na ostale prikazane rezultate, rezultati za scenarij *Materijalna oporaba* (Slika 58 – Slika 60) ne pokazuju dodatno smanjenje utjelovljene energije recikliranih materijala usred korištenja energije oporabljene iz otpada iz razloga što ovaj scenarij ne obuhvaća tehnologije

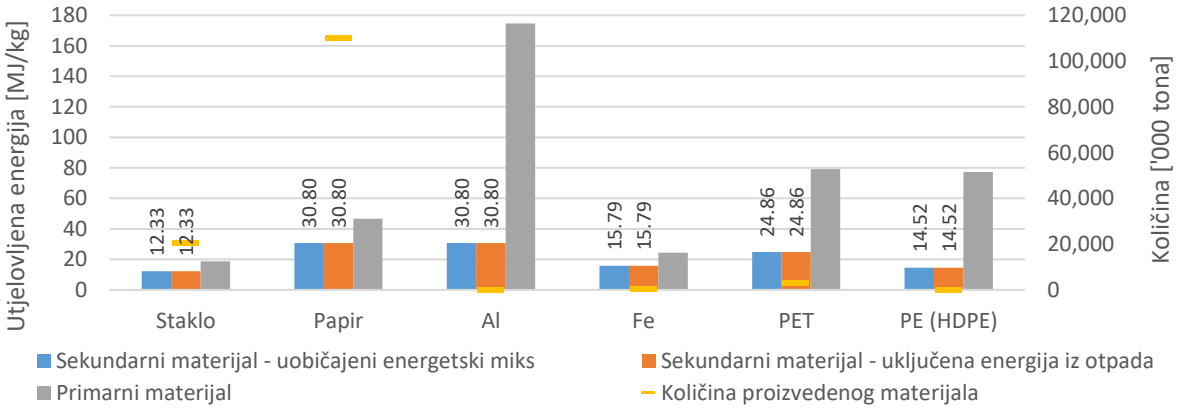
energetske oporabe otpada koje kao izlaz imaju energetske vektore koji bi se mogli koristiti za pogon tehnologija u analiziranom sustavu.



Slika 58. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba (Danas)

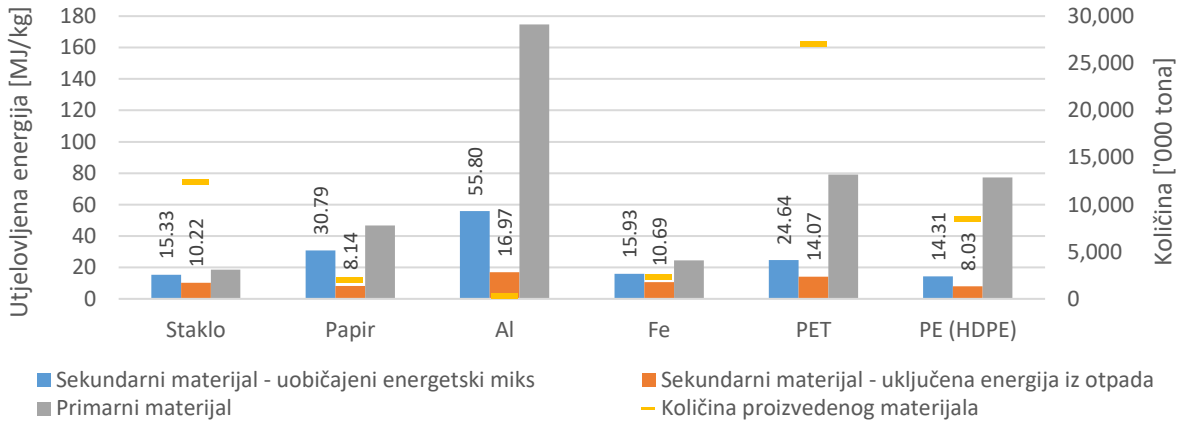


Slika 59. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba (2020)

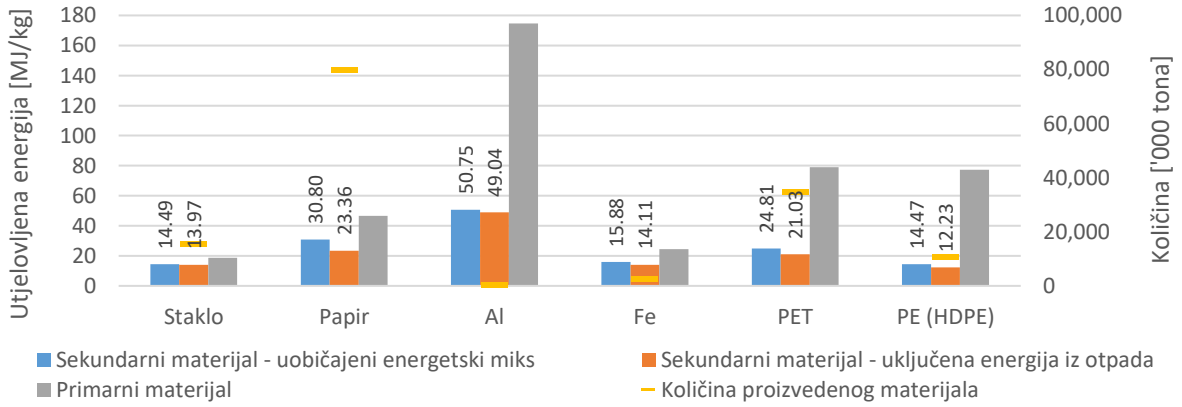


Slika 60. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba (2030)

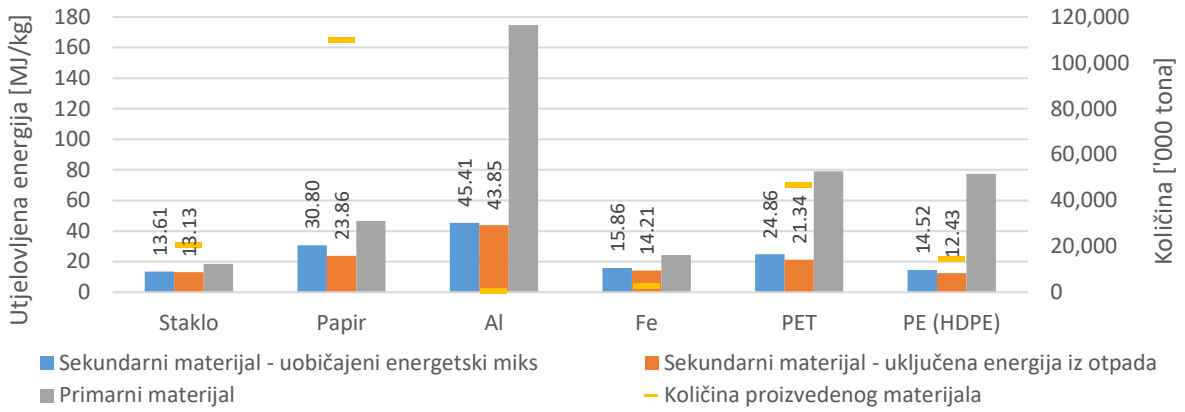
Na Slika 61 – Slika 63 su prikazani rezultati scenarija *Materijalna oporaba s AD* iz kojih se može vidjeti da i relativno mala količina energije koja je oporabljena isključivo putem bioplina dobivenog AD biootpada može imati vidljiv učinak na smanjenje utjelovljene energije proizvedenih sekundarnih materijala. Ovo smanjenje se vidi unatoč najvećoj količini oporabljenih materijala od svih analiziranih scenarija koja je rezultat povećane separacije plastičnog otpada.



Slika 61. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba s AD (Danas)

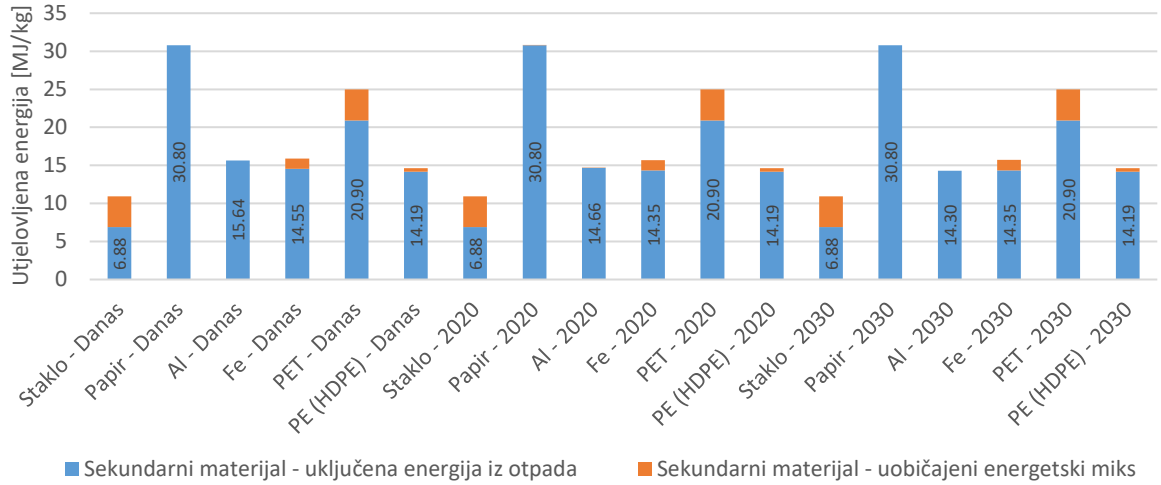


Slika 62. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba s AD (2020)

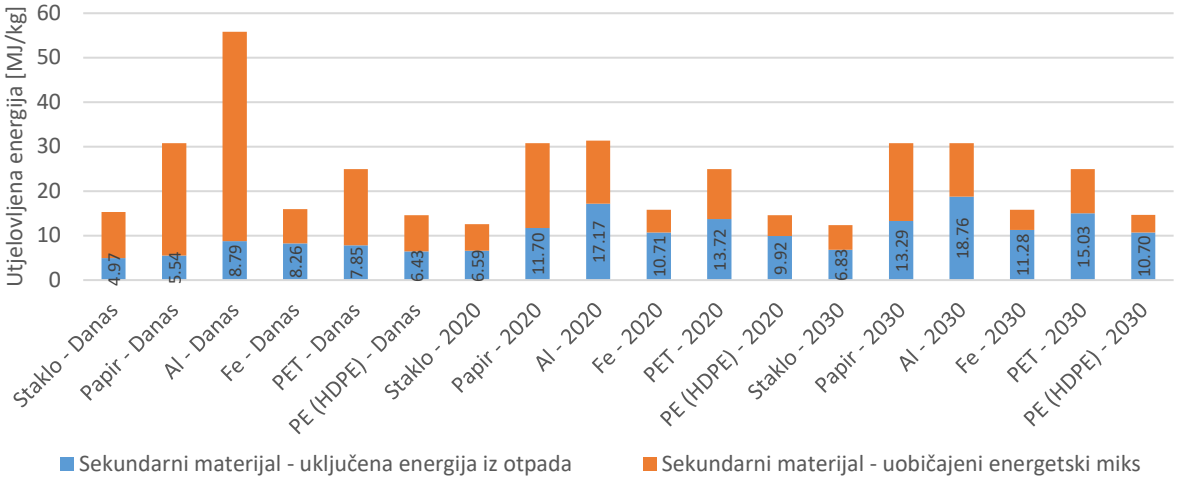


Slika 63. Utjelovljena energija u materijalima – Materijalna oporaba s AD (2030)

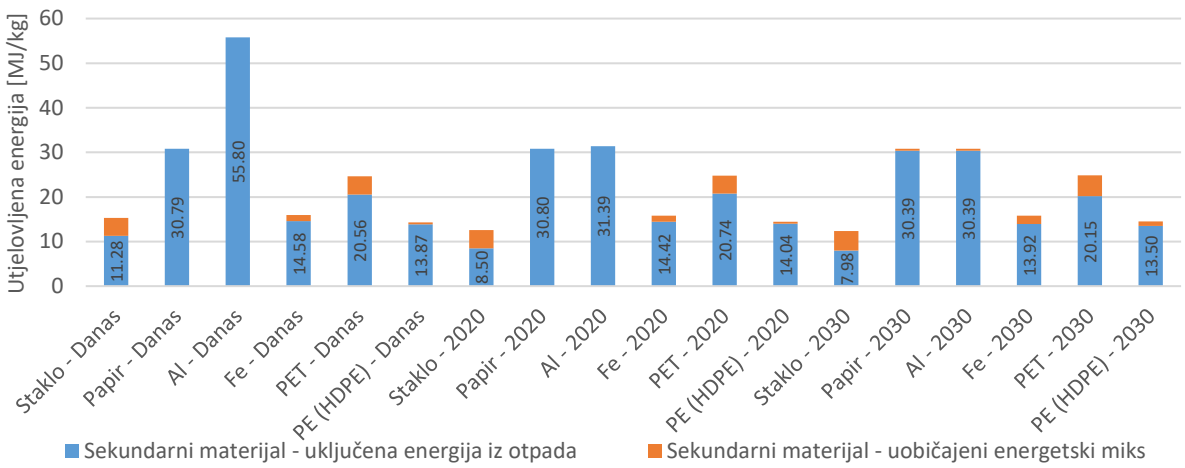
Prethodnim slikama dan je grafički prikaz rezultata po scenarijima za varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju. Rezultati za ostale varijante, za scenarije u kojima se događaju transformacije bioplina u biometan i SPP, prikazane su dijagramima na Slika 64 – Slika 69.



Slika 64. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Postojeći sustav – varijanta proizvodnje biometana



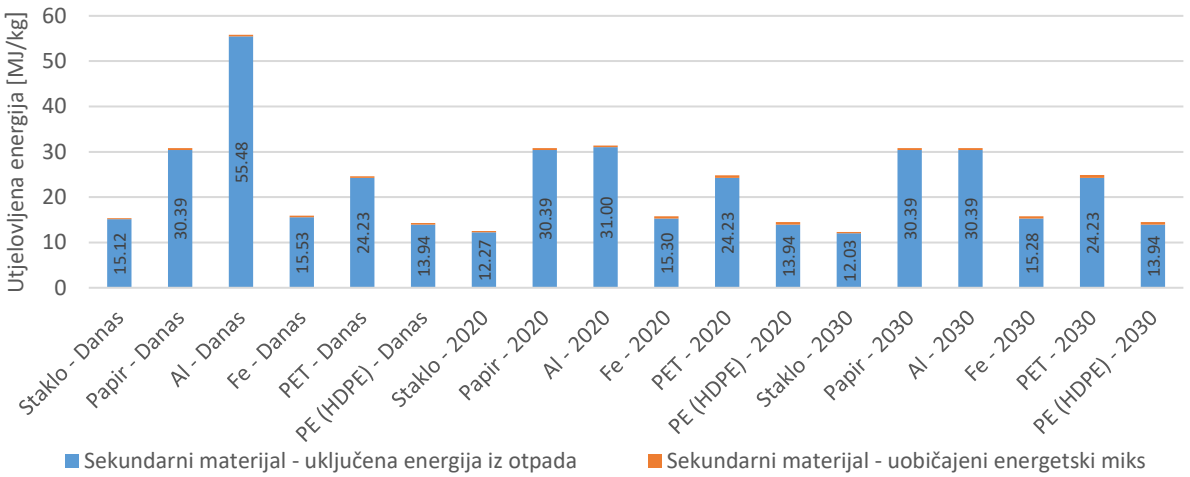
Slika 65. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Energetska oporaba – varijanta proizvodnje biometana



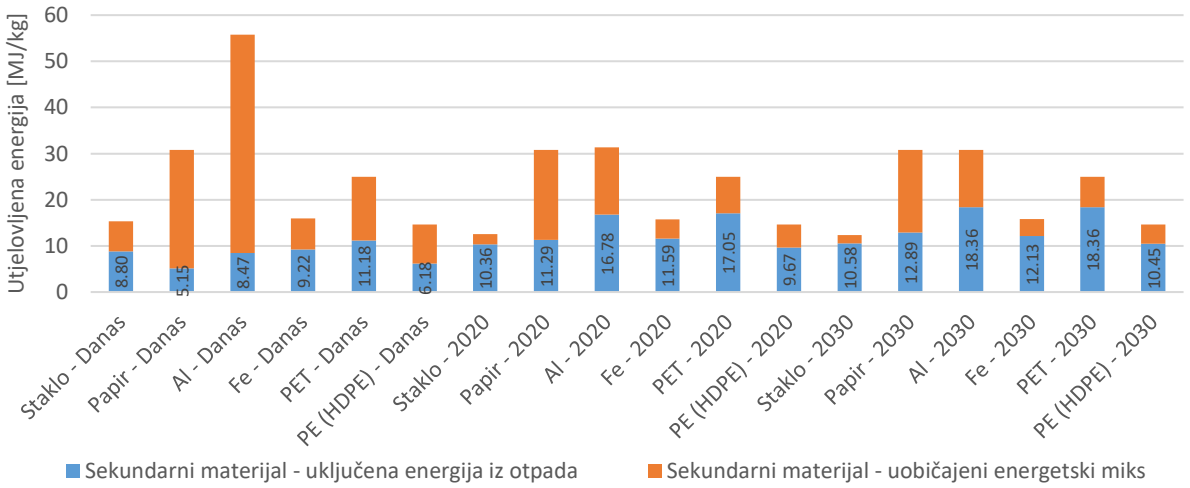
Slika 66. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Materijalna oporaba s AD – varijanta proizvodnje biometana

Iz rezultata za varijantu transformacije bioplina u biometan za scenarije *Postojeći sustav* i *Materijalna oporaba s AD* (Slika 64. i Slika 66), čime se (djelomično) zadovoljavaju potrebe za prirodnim plinom, može se uočiti smanjenje utjelovljene energije samo kod stakla, željeza i plastičnih materijala, s tim da je smanjenje izrazito malo kod HDPE. U odnosu na varijantu transformacije bioplina u kogeneracijskom postrojenju, mogu se uočiti manje vrijednosti utjelovljene energije stakla u svim razmatranim scenarijima što je rezultat korištenja veće količine proizvedenog plina te hiperprodukcije ostalih energenata u odnosu na potrošnju.

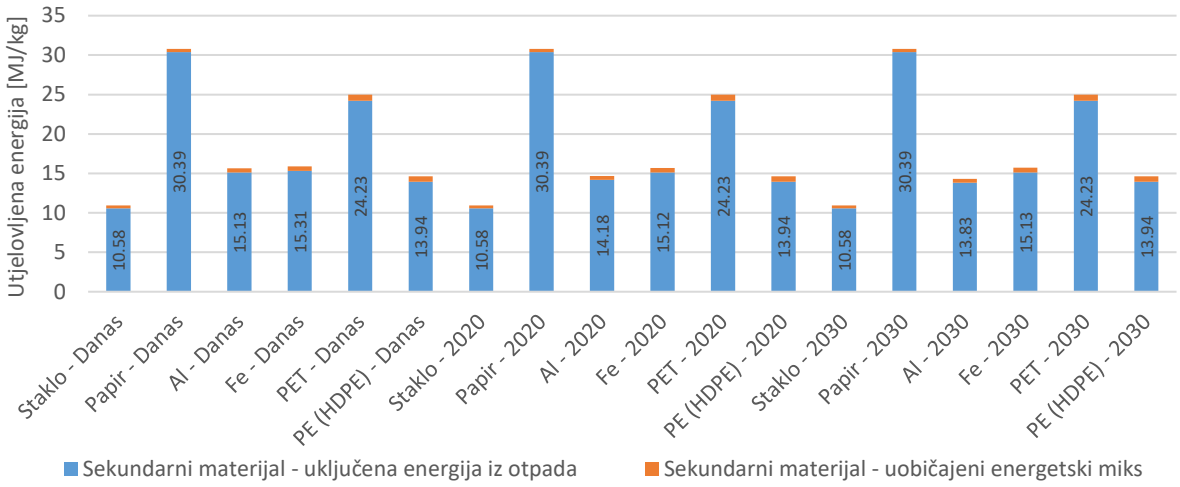
Za razliku od prethodnih scenarija, čija se energetska oporaba bazira samo na generiranju odlagališnog plina ili bioplina, kada se pogledaju rezultati za scenarij *Energetska oporaba* (Slika 65), koji dodaje TOO, mogu se vidjeti dosta veća smanjenja utjelovljene energije proizvedenih materijala. Iznosi utjelovljene energije kod stakla, željeza i plastičnih materijala su manji nego u prethodno razmotrenoj varijanti (varijanti kogeneracijske transformacije bioplina) što također proizlazi iz korištenja veće količine plina u proizvodnim lancima te hiperprodukcije električne i toplinske energije u odnosu na potrošnju.



Slika 67. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Postojeći sustav – varijanta proizvodnje SPP



Slika 68. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Energetska oporaba – varijanta proizvodnje SPP



Slika 69. Utjecaj energetske oporabe na smanjenje utjelovljene energije u materijalima za scenarij Materijalna oporaba s AD – varijanta proizvodnje SPP

Kod transformacije proizvedenog bioplina u SPP u scenarijima koji energetsku oporabu vrše samo putem transformacije biootpada u bioplin (Slika 67 – Slika 69) dolazi do smanjenja utjelovljene energije za sve materijale, međutim ovo smanjenje je relativno malo u odnosu na druge varijante. U scenariju *Energetska oporaba* (Slika 68), zadovoljavanje energetskih potreba u transportu smanjuje utjelovljenu energiju materijala zajedno sa zadovoljavanjem električnih i toplinskih potreba te su stoga ukupna smanjenja veća. Stoga su u vremenskom okviru Danas smanjenja veća, za sve materijale, nego u varijanti s kogeneracijskom proizvodnjom, dok su u odnosu na varijantu proizvodnje biometana veća za papir, aluminij i HDPE. U ostalim vremenskim okvirima dolazi do manjeg smanjenja u odnosu na druge varijante.

Sveukupni rezultati po godinama i scenarijima (Tablica 37) pokazuju da se korištenjem sekundarnih sirovina (separiranih otpadnih materijala iz komunalnog otpada) u proizvodnji smanjuje utjelovljenu energiju proizvedenih (sekundarnih) materijala za prosječno 73% do 74%, u scenarijima *Postojeći sustav* i *Plan* te 63% do 69% u scenarijima *Energetska oporaba* i *Materijalna oporaba*, ovisno o analiziranom vremenskom okviru, u usporedbi s proizvodnjom primarnih materijala. Ta smanjenja potvrđuju tezu da materijalna oporaba otpada i otpadnih materijala može doprinijeti povećanju održivosti proizvedenih sekundarnih materijala. Istodobno, ovi rezultati pokazuju samo polovicu slike, jer integracija energije oporabljene iz otpada, u istim proračunima, dovodi do dodatnog smanjenja utjelovljene energije i to za 19% do 53% u scenariju *Postojeći sustav*, 33% do 53% u scenariju *Plan*, 57% do 67% u slučaju scenarija *Energetska oporaba*, 0% u scenariju *Materijalna oporaba* te 16% do 57% u scenariju

Materijalna oporaba s AD, ovisno o vremenskom okviru koji se razmatra. Veća smanjenja se mogu uočiti u vremenskom okviru *Danas* što je rezultat potpunog pokrivanja električnih i toplinskih potreba zbog relativno malog energetskog konzuma koji proizlazi iz manje proizvodnje sekundarnih materijala.

Tablica 37. Smanjenje utjelovljene energije – varijanta kogeneracijske proizvodnje

	Vremenski okvir	Smanjenje utjelovljene energije recikliranih* materijala zbog materijalne oporabe	Dodatno smanjenje utjelovljene energije recikliranih materijala zbog energetske oporabe	Ukupno smanjenje utjelovljene energije recikliranih materijala
Postojeći sustav	Danas	73,18%	52,95%	87,38%
	2020	73,46%	30,74%	81,62%
	2030	73,55%	19,16%	78,61%
Plan	Danas	73,23%	53,17%	87,46%
	2020	73,46%	37,10%	83,31%
	2030	73,55%	32,81%	82,23%
Energetska oporaba	Danas	62,59%	67,12%	87,70%
	2020	69,08%	58,58%	87,20%
	2030	69,27%	56,82%	86,73%
Materijalna oporaba	Danas	62,74%	0,00%	62,74%
	2020	69,16%	0,00%	69,16%
	2030	69,32%	0,00%	69,32%
Materijalna oporaba s AD	Danas	62,74%	56,56%	83,82%
	2020	69,16%	41,40%	81,93%
	2030	69,32%	16,37%	74,35%

*sekundarnih materijala

Prethodno navedeni rezultati se odnose na varijantu transformacije proizvedenog bioplina za zadovoljavanje električnih i toplinskih potreba sustava. U Tablica 38 prikazani su rezultati po pojedinim scenarijima za varijantu transformacije proizvedenog bioplina u biometan koji se koristi za zadovoljavanje (dijela) potreba za prirodnim plinom. Iz ovih rezultata se može uočiti manje smanjenje utjelovljene energije u scenarijima koji vrše energetsku oporabu otpada samo putem proizvodnje bioplina iz razloga što je manja potreba cjelokupnog sustava za prirodnim plinom nego za električnom i toplinskom energijom. Suprotna situacija je u slučaju scenarija *Energetska oporaba*, za vremenski okvir analize koji opisuje današnje stanje, gdje ovakva

transformacije bioplina dodatno smanjuje utjelovljenu energiju u odnosu na prethodnu varijantu. Ovo se očituje dodatnim smanjenjem utjelovljene energije za 73% zbog energetske oporabe, u odnosu na 67% u prethodnoj varijanti. U ostalim vremenskim razdobljima uočava se manje smanjenje, kakvo je uočeno i u ostalim razmatranim scenarijima.

Tablica 38. Smanjenje utjelovljene energije – varijanta proizvodnje biometana

	Vremenski okvir	Smanjenje utjelovljene energije recikliranih* materijala zbog materijalne oporabe	Dodatno smanjenje utjelovljene energije recikliranih materijala zbog energetske oporabe	Ukupno smanjenje utjelovljene energije recikliranih materijala
Postojeći sustav	Danas	73,18%	8,79%	75,54%
	2020	73,46%	8,88%	75,82%
	2030	73,55%	8,91%	75,90%
Energetska oporaba	Danas	62,59%	73,43%	90,06%
	2020	69,08%	46,35%	83,41%
	2030	69,27%	41,31%	81,97%
Materijalna oporaba s AD	Danas	62,74%	6,33%	65,10%
	2020	69,16%	7,65%	71,52%
	2030	69,32%	9,89%	72,36%

*sekundarnih materijala

Što se tiče varijante transformacije bioplina u SPP (Tablica 39), vidljivi su slični rezultati samo s manjim dodatnim smanjenjem utjelovljene energije zbog upotrebe energije iz otpada. Stoga se u scenariju *Energetska oporaba* dolazi do smanjenja za 36% do 69%, dok je u ostala dva taj iznos na razini 1% do 3%. Ovi rezultati su lošiji od rezultata prethodne varijante.

Tablica 39. Smanjenje utjelovljene energije – varijanta proizvodnje SPP

	Vremenski okvir	Smanjenje utjelovljene energije recikliranih* materijala zbog materijalne oporabe	Dodatno smanjenje utjelovljene energije sekundarnih (recikliranih) materijala zbog energetske oporabe	Ukupno smanjenje utjelovljene energije sekundarnih (recikliranih) materijala
Postojeći sustav	Danas	73,18%	2,92%	73,96%
	2020	73,46%	2,90%	74,23%
	2030	73,55%	2,91%	74,32%
Energetska oporaba	Danas	62,59%	68,88%	88,36%
	2020	69,16%	41,02%	81,76%
	2030	69,32%	36,00%	80,34%
Materijalna oporaba s AD	Danas	62,74%	1,36%	63,25%
	2020	64,07%	1,77%	64,71%
	2030	65,53%	1,96%	66,21%

*sekundarnih materijala

Iako scenarij *Energetska oporaba* dovodi do najvećeg dodatnog smanjenja utjelovljene energije zbog korištenja energije oporabljene iz otpada, vrlo bliski su i rezultati ukupnog smanjenja za scenarij *Plan*, ali i *Postojeći sustav* te *Materijalna oporaba s AD*. Ulogu u tome ima i prethodno opažena razlika u utjelovljenoj energiji sekundarnih materijala, između pojedinih scenarija, proizvedenih s uobičajenim energetskim miksom, što je posljedica razlike u složenosti sustava te stoga i energetskim potrebama na razini primarne energije koje treba zadovoljiti. Manji stupanj smanjenja utjelovljene energije zbog korištenja oporabljene energije u scenarijima koji se baziraju na materijalnoj oporabi je rezultat i povećane količine proizvedenog sekundarnog materijala u odnosu na ostale scenarije.

Kada se usporede rezultati po varijantama, te uzmu u obzir prije prikazani rezultati o zadovoljavanju potreba za pojedinim energetskim vektorima, može se vidjeti da veliku ulogu u smanjenju utjelovljene energije proizvedenih materijala ima hiperprodukcija određenih energetskih vektora koja prelazi potrebe sustava. Ovdje do značaja može doći diversifikacija proizvodnje energenata kroz transformaciju bioplina u druge energetske oblike što u konačnici dovodi do većeg utjecaja na smanjenje utjelovljene energije u odnosu na proizvodnju samo električne i toplinske energije. Međutim, tehnološki naprednije transformacije bioplina sa sobom povlače i povećane gubitke u procesu te energetsku potrošnju, što ima negativan utjecaj. Usporedbom samih rezultata može se zaključiti da veći doprinos u smanjenju utjelovljene

energije ima zadovoljavanje relativno malog udjela električne energije nego kompletnog konzuma prirodnog plina ili energetskih potreba u transportu.

Navedeni rezultati daju odgovor na istraživačko pitanje uspoređujući smanjenje utjelovljene energije usred oporabe materijala i ukupnog mogućeg smanjenja koji se može postići kombiniranjem materijalne i energetske oporabe otpada. Rezultati pokazuju da oporabljena energija iz otpada može dodatno povećati održivost integriranog sustava gospodarenja komunalnim otpadom, iako se naglasak (kroz zakonodavstvo EU) stavlja na materijalnu oporabu, jer su u svim razmatranim scenarijima (i varijantama) ispunjeni zakonodavni ciljevi EU po pitanju gospodarenja komunalnim otpadom. Koristeći ovaj pristup, analizira se cjelovita slika integriranog sustava gospodarenja komunalnim otpadom te se može zaključiti da čak i relativno mala količina energije proizvedene putem energetske oporabe otpada može pomoći u „zatvaranju petlje“ unutar gospodarstva EU povećanjem održivosti recikliranja otpadnih materijala.

6.7. Socioekonomska analiza

Za ekonomsku analizu, pored troškova koji su definirani funkcijama navedenim u metodologiji ovoga rada, potrebno je kvantificirati i prihode sustava. Prethodno opisan pristup za praćenje masenih i energetskih tokova, baziran na UPR podacima, koristi se za izračunavanje proizvodnje materijala i energetskih vektora u analiziranim scenarijima. Budući da prema opisanim scenarijima tehnologije proizvodnje materijala nisu dio lokalnog sustava gospodarenja otpadom, iste nisu niti dio ove ekonomske analize. Stoga, maseni tokovi otpadnih materijala koji su u navedeni kao ulaz u tehnologije za proizvodnju sekundarnih materijala (Tablica 12) u ovome dijelu analize predstavljaju materijalni izlaz iz sustava gospodarenja komunalnim otpadom koji ulazi na tržište sekundarnih sirovina. Prihod od prodaje tih oporabljenih materijala izračunan je na temelju pokazatelja tržišnih cijena za prikupljeni materijal za mjesec siječanj 2018. godine (Tablica 5) te količina plasiranog otpada na tržište sekundarnih sirovina.

Što se tiče plasiranja energetskih vektora, prodajna cijena električne energije modelirana je na temelju lokalnog tarifnog sustava za električnu energiju iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije [246] te iznosi 73,6 €/MWh za električnu energiju iz kogeneracijskog postrojenja za TOO i 158 €/MWh za električnu energiju iz kogeneracijskog postrojenja na bioplin. Što se

tiče proizvedene topline, prodajna cijena topline izračunana je na bazi cjenika lokalnog distributera toplinske energije u centraliziranom toplinskom sustavu i iznosi 34 €/MWh [247]. Za pretpostavljen početni trošak termičke obrade gorive frakcije otpada (GIO) u cementari uzeta je nulta vrijednost.

Količine proizvedene energije iz otpada za varijantu energetske konverzije bioplina u kogeneracijskom postrojenju s bioplinskim motorom, po scenarijima i vremenskim periodima, prikazane su u Tablica 40.

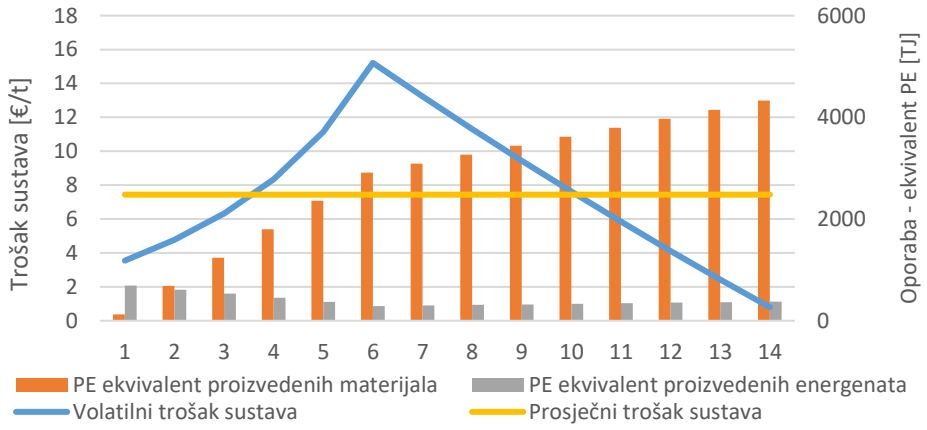
Tablica 40. Proizvedena energija iz otpada – varijanta kogeneracijske proizvodnje

	Postojeći sustav		**Plan**		**Energetska oporaba**		**Materijalna oporaba**		**Materijalna oporaba s AD**	
Godina	El. energija [MWh]	Toplinska energija [GJ]	Elrktrična energija [MWh]	Toplinska energija [GJ]	Električna energija [MWh]	Toplinska energija [GJ]	El. en. [MWh]	Topl. en. [GJ]	Električna energija [MWh]	Toplinska energija [GJ]
1	37.844	234.162	111.935	1.793.911	143.887	1.982.057	0	0	32.650	202.020
2	33.430	206.846	103.040	1.651.362	137.047	1.837.130	0	0	34.501	213.477
3	29.015	179.529	94.145	1.508.812	130.207	1.692.203	0	0	36.353	224.934
4	24.600	152.213	85.251	1.366.263	123.367	1.547.276	0	0	38.205	236.391
5	20.185	124.896	76.356	1.223.713	116.527	1.402.349	0	0	40.056	247.849
6	15.770	97.580	67.461	1.081.164	109.687	1.257.422	0	0	41.908	259.306
7	16.378	101.341	68.415	1.096.454	111.737	1.275.153	0	0	43.025	266.217
8	16.986	105.103	69.370	1.111.745	113.788	1.292.883	0	0	44.142	273.129
9	17.594	108.864	70.324	1.127.035	115.838	1.310.614	0	0	45.259	280.040
10	18.202	112.626	71.278	1.142.325	117.888	1.328.344	0	0	46.376	286.951
11	18.810	116.387	72.231	1.157.616	119.939	1.346.075	0	0	47.493	293.862
12	19.418	120.149	73.186	1.172.906	121.989	1.363.805	0	0	48.610	300.774
13	20.026	123.910	74.140	1.188.197	124.039	1.381.536	0	0	49.727	307.685
14	20.634	127.672	75.094	1.203.487	126.090	1.399.266	0	0	50.844	314.596

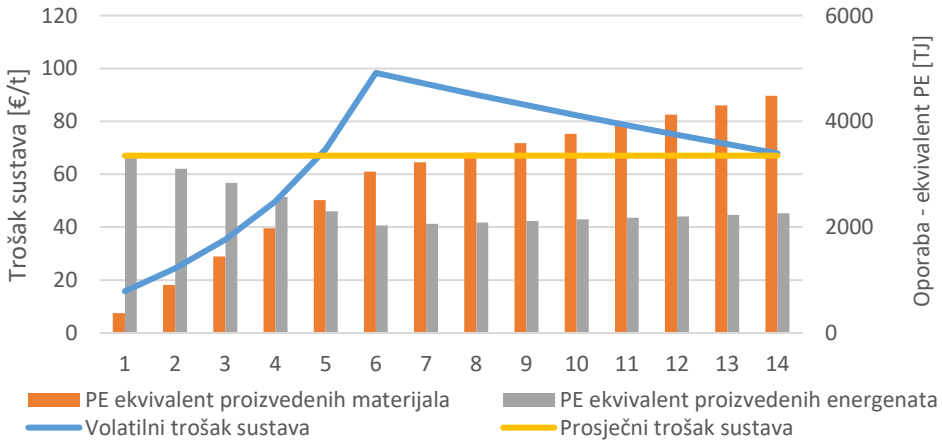
Svi izračuni su napravljeni za razdoblje od četrnaest godina zbog duljine trajanja ugovora o kupnji električne energije koja je definirana lokalnim tarifnim modelom. Financiranje kapitalnih investicija pokriveno je kreditom s realnom kamatnom stopom od 5,5%, a troškovi ulaganja amortiziraju se radi smanjenja poreza. Za stopu poreza na dobit uzeta je realna vrijednost stope od 20% koja je preuzeta iz lokalne legislative.

U ekonomskom proračunu, za svaku godinu, ekonomski novčani tok je držan na vrijednosti pozitivne nule, a ukupni trošak prikupljanja i obrađivanja otpada, kako je prikazan, prilagođavan je tom uvjetu. Konačni rezultati analize pokazuju dinamiku kretanja cijene sustava kroz razdoblje analize koja je prikazana na dijagramima na Slika 70 do Slika 74.

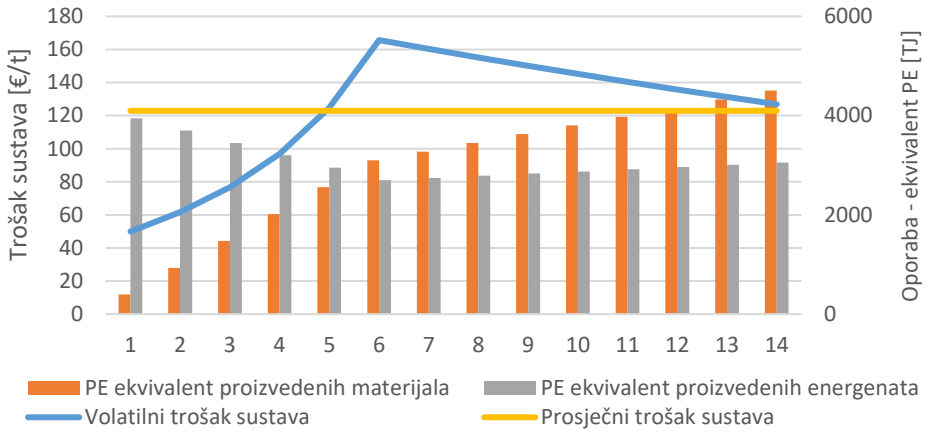
Da bi se bolje istražio odnos između troškova sustava i kretanja proizvodnje materijala i energenata tijekom vremena, trebalo je pronaći način na koji bi se sva proizvodnja mogla prikazati u jednom dijagramu. To se postiglo svođenjem proizvodnje materijala i energije analiziranog sustava na ekvivalente primarne energije (PE) koja se može prikazati na jednoj osi dijagrama množenjem prethodno iskazanih podataka o proizvodnji materijala i energenata s odgovarajućim CED faktorima. U posljednja dva scenarija, oporabljena energija iz ostatnog otpada u cementari je također uzeta u obzir kao energetska oporaba i prikazana dijagramima kao ekvivalent PE.



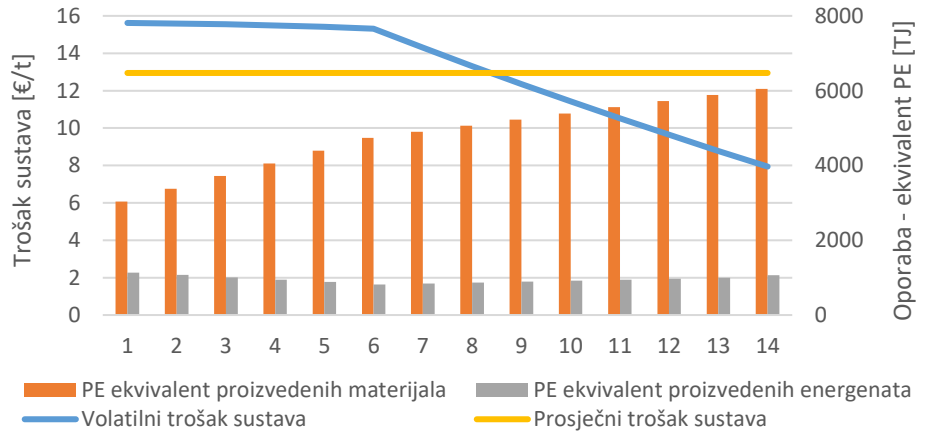
Slika 70. Trošak sustava – Postojeći sustav



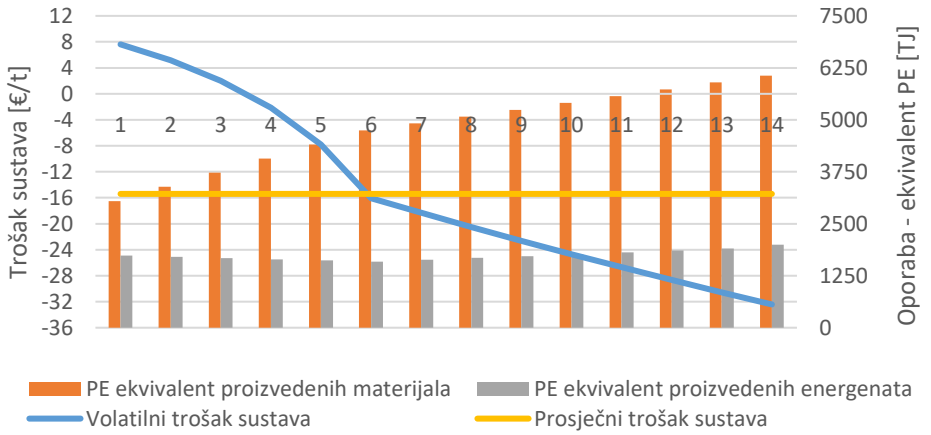
Slika 71. Trošak sustava - Plan



Slika 72. Trošak sustava – Energetska oporaba



Slika 73. Trošak sustava – Materijalna oporaba



Slika 74. Trošak sustava – Materijalna oporaba s AD

U grafičkom prikazu rezultata (Slika 70 do Slika 74), trošak sustava je izračunan kao ukupni trošak analiziranih tehnologija podijeljen s masom proizvedenog miješanog komunalnog otpada od strane korisnika sustava – otpada za koji se naplaćuje naknada za zbrinjavanje otpada.

Ovim načinom naplate je definiran poticaj za korisnike sustava na primarnu separaciju komunalnog otpada. Uočljivo je da su troškovi sustava u nekim razdobljima određenih scenarija negativni, a razlog tome je usporedba koja ne uključuje troškove skupljanja komunalnog otpada. Ovaj pristup je primijenjen zbog toga što je sustav skupljanja isti za sve razmatrane scenarije, što je rezultat zadovoljavanja europskih direktiva te stoga i generira isti trošak. Ovo se vidi kroz prikupljene količine različitih frakcija otpada u svakome scenariju (bilo kroz sustav prikupljanja otpada direktno od kućanstava ili kroz sustav skupljanja otpada putem zelenih otoka i reciklažnih dvorišta). Budući da uključivanje sustava skupljanja otpada u model ne bi rezultirao relativnom razlikom u ukupnim rezultatima, isti nije niti modeliran.

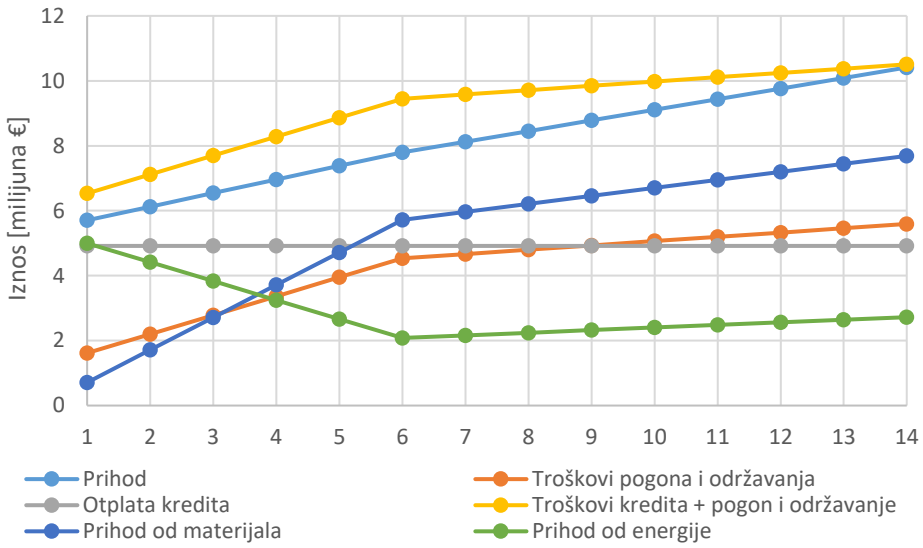
Iz prikazanih rezultata vidljivo je da svi scenariji osim scenarija *Materijalna oporaba s AD* imaju veći prosječni trošak sustava u odnosu na scenarij *Postojeći sustav*. To je scenarij koji se oslanja samo na primarnu separaciju otpada kako bi se povećale stope materijalne oporabe otpadnih materijala. Tehnologije materijalne oporabe se nalaze izvan granica analiziranog sustava te stoga njihovi investicijski i operativni troškovi nisu uzeti u obzir, a veza između analiziranog sustava i predmetnih tehnologija je uspostavljena isključivo putem tržišta sekundarnih sirovina.

Povećanjem složenosti lokalnog sustava gospodarenja otpadom (odnosno povećanjem broja tehnologija koje obuhvaća) povećava se i cijena (trošak) sveukupnog sustava. Kada se analizira povezanost energetske i materijalne oporabe otpadnih materijala s troškovima sustava, može se primijetiti da povećanje energetske oporabe (tj. uvođenje tehnologije za energetsku oporabu otpada) dovodi do najvećeg povećanja troškova sustava. To je najizraženije u scenarijima koji uključuju tehnologije TOO (scenariji *Plan* i *Energetska oporaba*) iz razloga što je to investicijski najskuplja tehnologija.

S druge strane, povećanje materijalne oporabe na uštrb energetske, smanjuje troškove sustava, što se može vidjeti iz usporedbe rezultata scenarija *Materijalna oporaba* i *Materijalna oporaba s AD* sa scenarijima *Plan* i *Energetska oporaba*. Iako uvođenje energetske oporabe otpada kroz njegovu termičku obradu povećava troškove sustava, ostale tehnologije za energetsku oporabu poput korištenja bioplina kod anaerobne digestije biootpada u sustavu gospodarenja otpadom temeljenom na materijalnoj oporabi mogu značajno smanjiti trošak sustava. Ovo se može vidjeti usporedbom rezultata scenarija *Materijalna oporaba* i *Materijalna oporaba s AD*, koji i

pokazuju najbolje rezultate među alternativnim scenarijima kada se gledaju ukupni troškovi sustava.

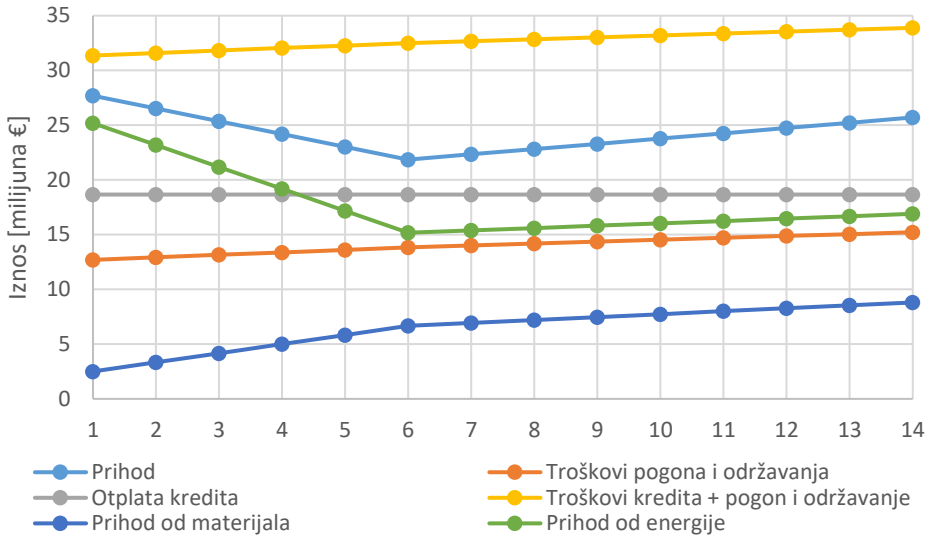
Kako bi se provela daljnja ekonomska analiza ovih scenarija, prihodi i troškovi sustava zasebno su prikazani na dijagramima na Slika 75 do Slika 79.



Slika 75. Analiza odnosa prihoda i troškova – Postojeći sustav

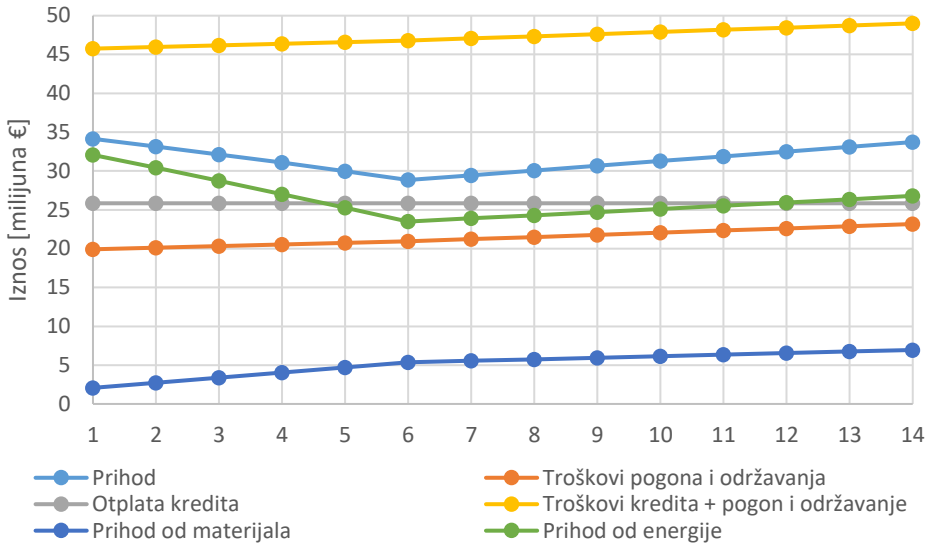
U navedenim dijagramima, razlika između linije Troškovi kredita + pogon i održavanje i linije Prihod predstavlja iznos troškova sustava koje korisnici sustava plaćaju, tj. troškove sustava čije je kretanje prikazano u dijagramima na Slika 70 do Slika 74.

Zbog oslanjanja isključivo na primarnu separaciju otpada kako bi se povećala stopa recikliranja, prihodi scenarija *Postojeći sustav* rastu s povećanjem primarne separacije otpada, a time i materijalne oporabe, što ujedno povećava pogonske troškove sustava (pogotovo zbog troškova tehnologija za separaciju odvojeno skupljenog otpada). Kako se stopa primarne separacije otpada povećava, količina odloženog otpada se smanjuje, što rezultira smanjenjem prihoda od energetske oporabe otpada putem ekstrakcije odlagališnog plina, koji ovdje predstavlja jedini način energetske oporabe otpada.



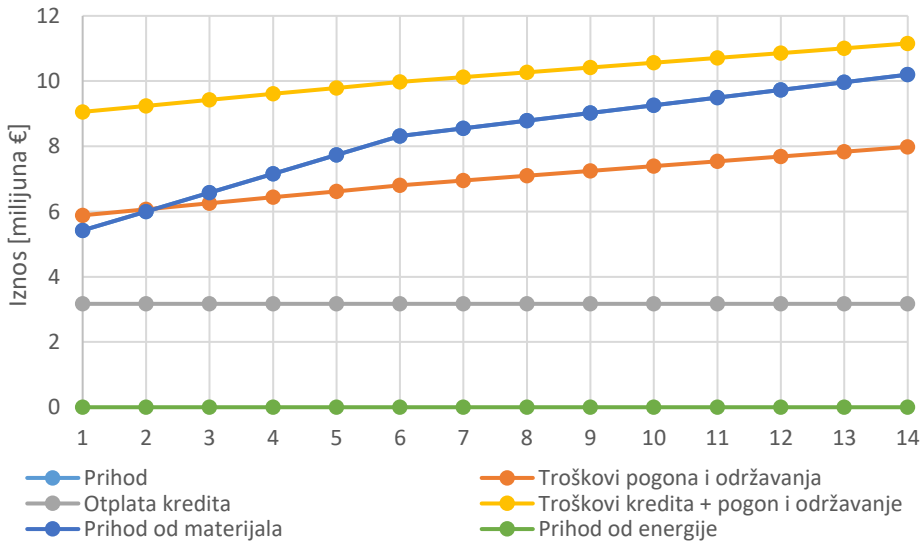
Slika 76. Analiza odnosa prihoda i troškova – Plan

Glavnina prihoda scenarija *Plan* ostvaruje se putem TOO (Slika 76), što dovodi do oštrog smanjenja prihoda sa smanjenjem količina otpada namijenjenoga za spaljivanje zbog povećanja primarne separacije. Materijalna oporaba većine otpadnih frakcija je na istoj razini kao i u scenariju *Postojeći sustav* i oslanja se isključivo na primarnu separaciju otpada. Razliku čini samo povećanje materijalne oporabe metala uslijed naknadne separacije metala iz proizvedenog pepela. Glavni ekonomski problem ovog scenarija je velika inicijalna investicija koja je koncentrirana u jednom postrojenju (kogeneracijskoj spalionici otpada) koja bi mogla predstavljati veliki problem općinama/gradovima. S druge strane, kada se početno ulaganje isplati (isplati kredit podignut za izgradnju postrojenja), ukupni troškovi sustava se smanjuju za prosječno oko 55%, čime se ekonomska situacija kompletno mijenja.



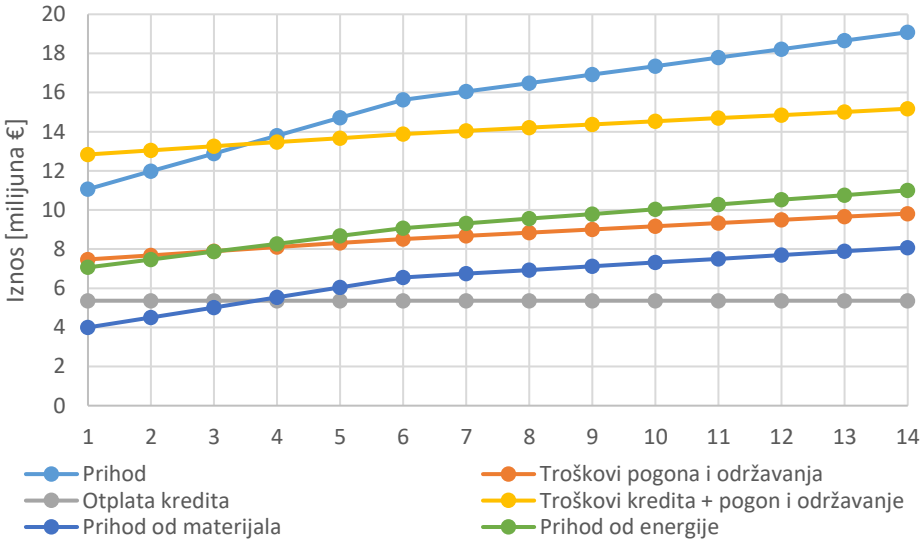
Slika 77. Analiza odnosa prihoda i troškova – Energetska oporaba

Scenarij *Energetska oporaba* (Slika 77) stavlja naglasak na energetsku oporabu i time prebacuje većinu prihoda na stranu prodaje energije dok još uvijek zadovoljava ciljeve EU po pitanju stope recikliranja kroz odvojeno skupljanje koju još dodatno povećava putem sekundarnog separacije otpada kroz mehaničko-biološku obradu. Ovaj scenarij još više naglašava problem velike inicijalne investicije čija godišnja otplata iznosi više od 25 milijuna eura. Prihodi od prodaje energije su (u prosjeku) na razini godišnje rate kredita, međutim povećani operativni troškovi još uvijek zahtijevaju visoku razinu sudjelovanja građana u financiranju sustava.



Slika 78. Analiza odnosa prihoda i troškova – Materijalna oporaba

Prihodi od prodaje materijala predstavljaju jedine prihode u scenariju *Materijalna oporaba* (Slika 78). Za razliku od prethodnih dvaju scenarija, zbog potpunog izuzimanja tehnologija oporabe iz granica sustava (izuzev postrojenja za kompostiranje biootpada), ovaj scenarij ima najmanji investicijski trošak koji lako može biti financiran od strane općina/gradova. Najveći problem kod ovakvih sustava predstavlja plasiranje skupljenih sekundarnih materijala na tržište te obrada ostatnog otpada iz postrojenja za MBO. U ovom izračunu je pretpostavljena cijena obrade gorive frakcije ostatnog otpada (GIO) u cementari od nula eura po toni, što može biti slučaj za kvalitetno GIO s visokom ogrjevnom vrijednošću i ostalim povoljnim karakteristikama (niski udio Hg, Cl, vlage, pepela, itd.).

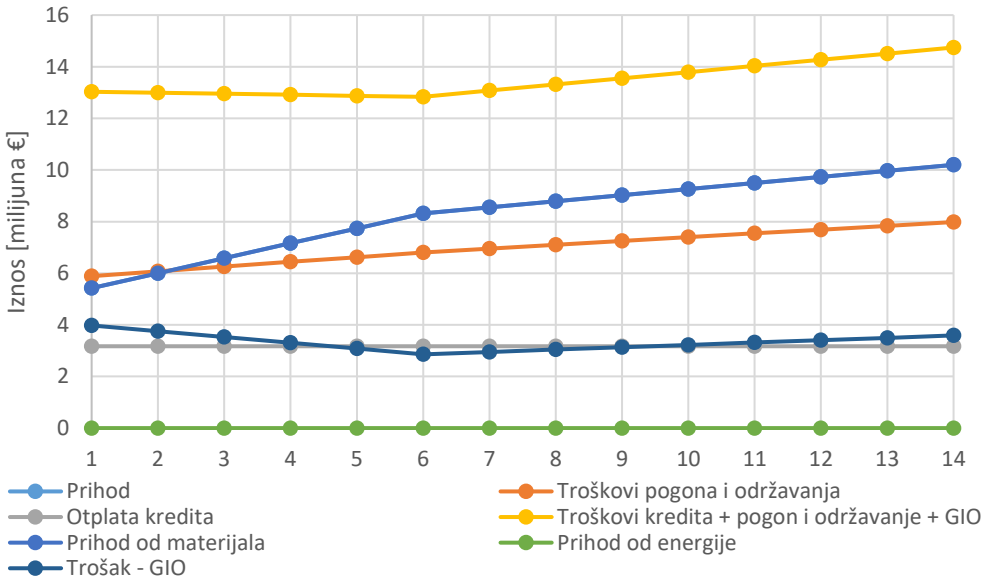


Slika 79. Analiza odnosa prihoda i troškova – Materijalna oporaba s AD

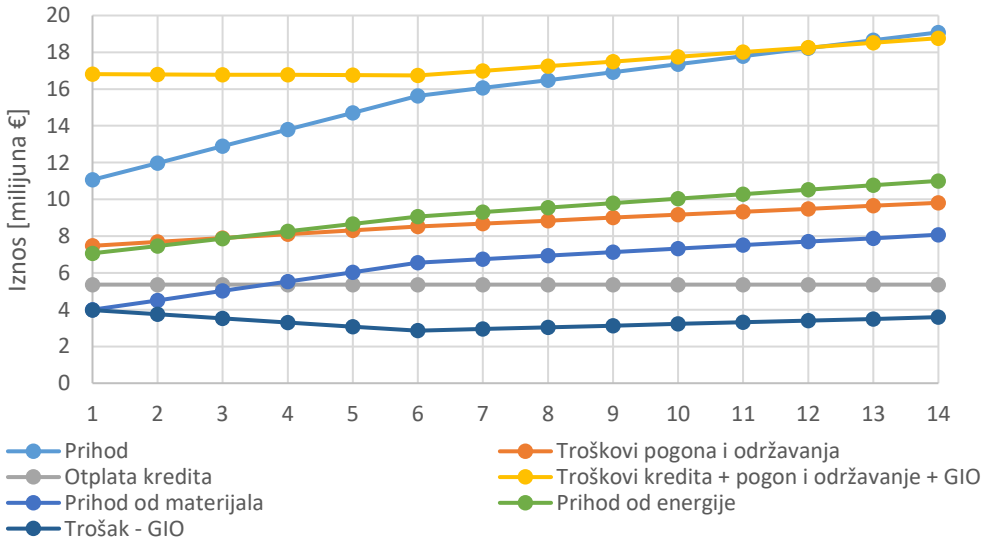
Budući da je dohodak od proizvedenog komposta znatno niži od prihoda ostvarenih putem prodaje energije proizvedene putem AD biootpada, dok istodobno AD također povećava stopu povrata primarne energije u analiziranim scenarijima, postrojenje za kompostiranje se u scenariju *Materijalna oporaba s AD* zamjenjuje s postrojenjem za AD i kogeneracijskim postrojenjem s bioplinskim motorom. U ovome se slučaju prihodi povećavaju iznad ukupnih troškova sustava (Slika 79) te ovaj scenarij predstavlja najbolji slučaj s ekonomskog stajališta.

Problem troška tretmana ostatnog otpada iz postrojenja za MBO (gorive frakcije ostatog otpada tj. GIO) u cementari je posebno sagledan, na način da su u scenarijima koji sadržavaju ovakav način tretiranja ove vrste otpada povišene cijene preuzimanja takvog otpada od strane cementare. Podaci o kretanju cijena preuzimanja ovakvog otpada u cementarama govore o iznosima od 40 do 50 €/t u vrhuncu potražnje za ovakvom uslugom [248], [249] dok se obično

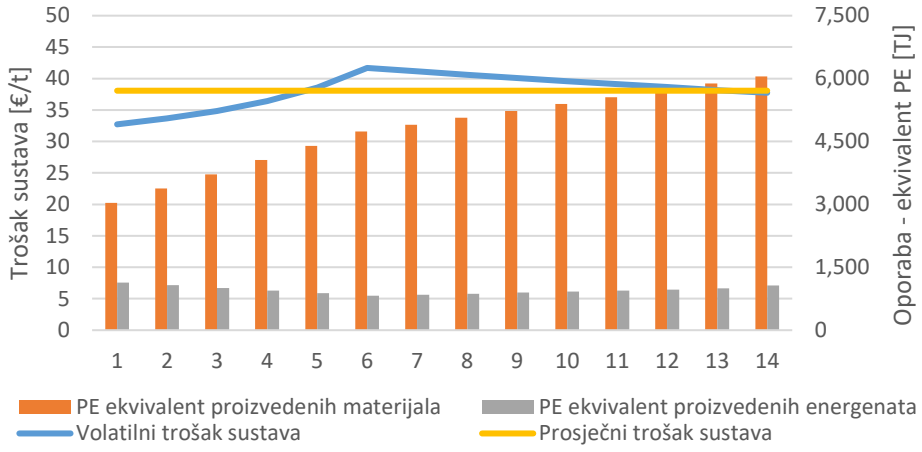
cijena kreće na razini od -20 do +20 €/t [230]. Negativna cijena ima smisla jer zamjena ugljena u cementarama s GIO omogućava postizanje ušteda do 50 €/t za cementaru ponuđača takve usluge [250]. Iz ovih podataka je modeliran iznos od 40 €/t koji predstavlja situaciju kada je potrebno plaćati za zbrinjavanje ovakvog otpada. Na osnovi ove analize biti će procijenjena i maksimalna prihvatljiva vrijednost cijene preuzimanja pri čemu su ovakvi sustavi još uvijek ekonomski prihvatljivi u odnosu na ostale scenarije. Prema ovome su proračuni za scenarije *Materijalna oporaba* i *Materijalna oporaba s AD* prilagođeni da obuhvaćaju i ovaj trošak te prikazani Slika 80 – Slika 83.



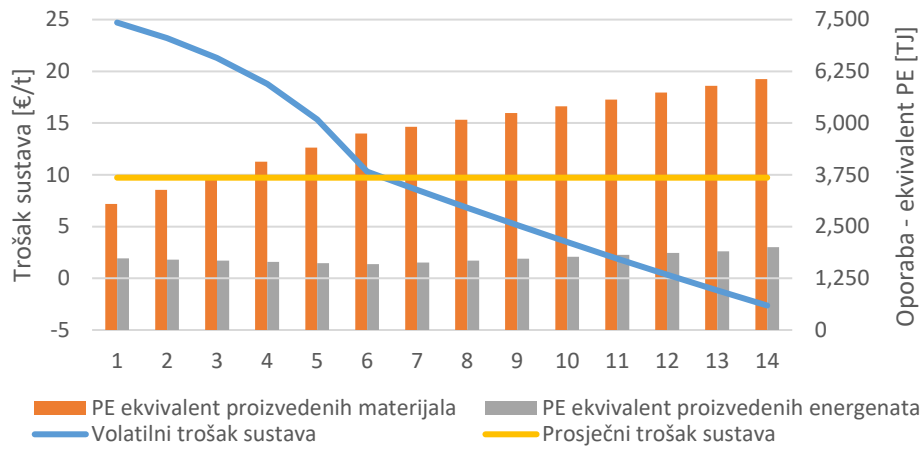
Slika 80. Trošak sustava – Materijalna oporaba – uključen trošak termičke obrade GIO



Slika 81. Trošak sustava – Materijalna oporaba s AD – uključen trošak termičke obrade GIO



Slika 82. Trošak sustava – Materijalna oporaba – uključen trošak termičke obrade GIO



Slika 83. Trošak sustava – Materijalna oporaba s AD – uključen trošak termičke obrade GIO

Kao što se vidi iz prikazanih rezultata, uvođenjem troška za termički tretman GIO u cementnoj peći, razmatrani scenariji još uvijek pokazuju najmanji ukupni trošak sustava u odnosu na ostala tri alternativna scenarija. Scenariji *Materijalna oporaba* i *Materijalna oporaba s AD* pokazuju lošije ekonomske rezultate od scenarija *Plan* samo u slučaju povećanja navedene naknade za preko 80 €/t odnosno preko 110 €/t. Usporedba troškova analiziranih sustava je prikazana Tablica 41.

Tablica 41. Usporedba troškova analiziranih sustava

Godina	Postojeći sustav - kogeneracija		Plan		Energetska oporaba - kogeneracija		Materijalna oporaba*		Materijalna oporaba s AD - kogeneracija*	
	Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]	
	Prosječni	Volatilni	Prosječni	Volatilni	Prosječni	Volatilni	Prosječni	Volatilni	Prosječni	Volatilni
1	7,44	3,55	67,04	15,79	122,92	49,94	38,07	32,72	9,72	24,71
2		4,77		24,41		61,66		33,66		23,21
3		6,32		35,35		76,77		34,85		21,30
4		8,35		49,74		96,85		36,41		18,79
5		11,14		69,50		124,70		38,56		15,35
6		15,21		98,32		165,66		41,69		10,32
7		13,24		94,15		160,36		41,15		8,54
8		11,31		90,09		155,19		40,62		6,81
9		9,44		86,14		150,16		40,10		5,13
10		7,62		82,30		145,25		39,60		3,49
11		5,85		78,56		140,47		39,11		1,90
12		4,12		74,91		135,80		38,64		0,35
13		2,44		71,36		131,25		38,17		-1,16
14		0,80		67,90		126,80		37,72		-2,64

* s uračunatim troškom za termički tretman GIO u cementnoj peći od 40 €/t

Ako se promatra volatilnost troškova sustava, ona je najmanja u scenariju *Materijalna oporaba* i razlika između najmanjih i najvećih vrijednosti troška sustava iznosi 8,87 €/t. Najveća volatilnost je zabilježena u scenariju *Energetska oporaba* i iznosi od 115,72 €/t, dok u scenarijima *Postojeći sustav*, *Plan* i *Materijalna oporaba* ova vrijednost iznosi 14,41 €/t, 81,53 €/t, odnosno 27,35 €/t. Vrijednost volatilnosti je značajna u ovome kontekstu jer se troškovi usluge prikupljanja otpada koje građani plaćaju ne mogu tako često mijenjati bez dodatnog naglašavanja problema socioekonomske prihvatljivosti.

U Tablica 42 dani su rezultati za alternativne varijante transformacije bioplina i odlagališnog plina u analiziranim scenarijima.

Tablica 42. Usporedba troškova analiziranih alternativnih varijanti transformacije bioplina

Godina	**Postojeći sustav - bioplin**		**Energetska oporaba - bioplin**		**Materijalna oporaba s AD - bioplin***		**Postojeći sustav - SPP**		**Energetska oporaba - SPP**		**Materijalna oporaba s AD - SPP***	
	Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]		Trošak sustava [€/t]	
	Prosjek	Volatilni	Prosjek	Volatilni	Prosjek	Volatilni	Prosjek	Volatilni	Prosjek	Volatilni	Prosjek	Volatilni
1	20,64	16,05	177,76	73,20	64,46	47,97	15,67	10,46	135,48	55,37	26,00	31,76
2		17,30		89,44		50,65		11,93		68,38		31,50
3		18,88		110,11		54,06		13,81		84,94		31,17
4		20,97		137,27		58,53		16,29		106,70		30,74
5		23,83		174,57		64,68		19,68		136,59		30,14
6		28,01		229,00		73,66		24,64		180,19		29,27
7		26,24		224,36		72,58		22,43		174,96		27,65
8		24,51		219,85		71,53		20,29		169,87		26,08
9		22,82		215,46		70,51		18,20		164,92		24,55
10		21,19		211,19		69,52		16,17		160,10		23,06
11		19,59		207,03		68,56		14,19		155,41		21,61
12		18,04		202,98		67,61		12,27		150,84		20,19
13		16,52		199,03		66,70		10,39		146,39		18,82
14		15,05		195,19		65,80		8,56		142,05		17,47

* s uračunatim troškom za termički tretman GIO u cementnoj peći od 40 €/t

Međusobnom usporedbom rezultata svih triju varijanti transformacije bioplina, za scenarije *Postojeći sustav*, *Energetska oporaba* te *Materijalna oporaba s AD*, vidljivo je da varijanta transformacije proizvedenog bioplina u kogeneracijskom postrojenju rezultira ukupno najmanjim troškovima sustava koji se moraju preliti na korisnike sustava u obliku cijene skupljanja i zbrinjavanja proizvedenog miješanog komunalnog otpada.

Na bazi svih prikazanih rezultata, može se zaključiti da energetska oporaba otpada donosi veći prihod prodajom proizvedenih energenata nego što se može ostvariti prodajom skupljenih sekundarnih sirovina te je ustvari samo bitno kolike troškove (investicijske i operativne) veže za sebe. Tako je vidljivo da TOO rezultira velikim godišnjim troškovima koje je potrebno pokriti kroz povećanje naknade za zbrinjavanje komunalnog otpada, dok AD ima manje troškove koji rezultiraju sveukupno pozitivnom bilancom te smanjenjem predmetnih troškova za građane.

6.8. Multikriterijsko rangiranje

Krajnji rezultati dobiveni iz prethodnih analiza, CED analize utjecaja, analize smanjenja utjelovljene energije, te socioekonomske analize, predstavljaju ulazne podatke u MCDM analizu pomoću koje su rangirane razmatrane alternative. Ulazni podaci su prikazani Tablica 43 – Tablica 46.

Tablica 43. Ulazni podaci u MCDM analizu – razdoblje Danas [3]

	PS - K	PS - B	PS - SPP	Plan	EO - K	EO - B	EO - SPP	MO	MOsAD - K	MOsAD - B	MOsAD - SPP
PPE [%]	7,66	6,88	6,00	36,85	36,53	35,82	35,07	35,97	41,09	41,16	40,41
SUE [%]	87,38	75,54	73,96	87,46	87,70	90,06	88,36	62,74	83,82	65,10	63,25
SEA [€/t]	3,55	16,05	10,46	15,79	49,94	73,20	55,37	32,72	24,71	47,97	31,76

Tablica 44. Ulazni podaci u MCDM analizu – razdoblje 2020 [3]

	PS - K	PS - B	PS - SPP	Plan	EO - K	EO - B	EO - SPP	MO	MOsAD - K	MOsAD - B	MOsAD - SPP
PPE [%]	26,41	26,17	25,87	41,52	43,49	42,69	41,90	43,21	48,89	48,33	47,54
SUE [%]	81,62	75,82	74,23	83,31	87,20	83,41	81,76	69,16	81,93	71,52	64,71
SEA [€/t]	15,21	28,01	24,64	98,32	165,66	229,00	180,19	41,69	10,32	73,66	29,27

Tablica 45. Ulazni podaci u MCDM analizu – razdoblje 2030 [3]

	PS - K	PS - B	PS - SPP	Plan	EO - K	EO - B	EO - SPP	MO	MOsAD - K	MOsAD - B	MOsAD - SPP
PPE [%]	30,95	30,70	30,38	43,35	44,68	43,89	43,15	43,97	49,37	48,78	48,04
SUE [%]	78,61	75,90	74,32	82,23	86,73	81,97	80,34	69,32	74,35	72,36	66,21
SEA [€/t]	0,80	15,05	8,56	67,90	126,80	195,19	142,05	37,72	-2,64	65,80	17,47

Tablica 46. Ulazni podaci u MCDM analizu – ukupni rezultati [3]

	PS - K	PS - B	PS - SPP	Plan	EO - K	EO - B	EO - SPP	MO	MOsAD - K	MOsAD - B	MOsAD - SPP
PPE [%]	21,66	21,25	20,75	40,58	43,07	42,30	41,54	41,05	46,45	46,09	45,33
SUE [%]	82,54	75,75	74,17	84,33	87,21	85,15	83,49	67,07	80,03	69,66	64,72

[3] PPE – Povrat primarne energije; SUE – Smanjenje utjelovljene energije; SEA – Socioekonomska analiza; PS – K – Postojeći sustav, varijanta kogeneracijske proizvodnje; PS – B – Postojeći sustav, varijanta proizvodnje biometana; PS – SPP – Postojeći sustav, varijanta proizvodnje SPP; EO – K – Energetska oporaba, varijanta kogeneracijske proizvodnje, EO – B – Energetska oporaba, varijanta proizvodnje biometana; EO – SPP – Energetska oporaba, varijanta proizvodnje SPP; MOsAD – K – Materijalna oporaba s AD, varijanta kogeneracijske proizvodnje; MOsAD – B – Materijalna oporaba s AD, varijanta proizvodnje biometana; MOsAD – SPP – Materijalna oporaba s AD, varijanta proizvodnje SPP

SEA [€/t]	7,44	20,64	15,67	67,04	122,92	177,76	135,48	38,07	9,72	64,46	26,00

Navedeni ulazni podaci opisuju rezultate pojedinih scenarija po pitanju ekološkog utjecaja te smanjenja ukupnog materijalnog i energetskog intenziteta (utjecaja na ovisnost o uvozu sirovina) (što je opisano putem rezultata kriterija Povrat primarne energije (PPE)), utjecaja na europsko (kružno) gospodarstvo i promoviranje industrijske simbioze (što je opisano putem rezultata kriterija Smanjenje utjelovljene energije (SUE)) te utjecaja na ekonomsku održivost i socijalna prihvatljivost (što je opisano putem rezultata kriterija Socioekonomska analiza (SEA)).

PROMETEE i GAIA analize su provedene pomoću Visual PROMETHEE [238] računalnog paketa. U zadanom višekriterijskom problemu, traži se maksimizacija kriterija Povrat primarne energije i Smanjenje utjelovljene energije te minimizacija kriterija Socioekonomska analiza.

Kako se htjelo definirati usko područje indiferencije, te djelomične preferencije, u kojem je preferencija između dvaju alternativnih scenarija po određenom kriteriju nepostojeća ili djelomična, u MCDM analizi je korištena funkcija kriterija s linearnom preferencijom i zadanim područjem indiferencije.

Pojam preferencije predstavlja davanje prednosti pri izboru između realnih alternativa. U ovome slučaju se govori o području preferencije koje je definirano pragom stroge preferencije (p), sukladno prikazu na Slika 21. O striktnoj preferenciji govorimo kada je razlika u vrijednosti alternativa po pojedinom kriteriju dovoljno velika (veća od vrijednosti definirane pragom stroge preferencije (p)) da se može jednoznačno dati prednost jednoj od razmatranih alternativa. S druge strane imamo pojam indiferencije koji predstavlja stanje neutralnosti prema ijednoj od alternativa. Područje indiferencije predstavlja područje nedovoljne razlike u vrijednostima alternativa po pojedinom kriteriju da bi se mogla utvrditi prednost jedne alternative nad drugom. Ovo područje je definirano pragom indiferentnosti, tj. nastupa ukoliko je razlika u vrijednosti alternativa po pojedinom kriteriju manja od praga indiferentnosti (q). Ova dva područja spaja područje djelomične preferencije, koja je u ovome slučaju linearna te označava područje djelomične preferencije razmatrane alternative te je istovremeno određeno pragom stroge preferencije (p) i pragom indiferentnosti (q).

Prag indiferentnosti (q) i prag stroge preferencije (p) su zadani kao 1%, odnosno 2%, razlike minimalne i maksimalne vrijednosti pojedinog kriterija te iznose 0,38/0,7 za kriterij povrata

primarne energije, 0,27/0,55 za kriterij smanjenja utjelovljene energije te 0,7/1,4 za kriterij socioekonomske analize.

Težinski faktori (w_i) za pojedine kriterije su određeni na bazi ocjene zadovoljavanja legislativnih ciljeva, europskih strateških ciljeva te lokalnih ciljeva. Tako kriterij povrata primarne energije govori o utjecaju sustava na sigurnost isporuke materijalnih sirovina i energetskih vektora kao i o utjecaju na okoliš, kriterij smanjenja utjelovljene energije govori o „zatvaranju petlje“ kroz ponovnu uporabu oporabljenih materijalnih i energetskih sirovina čime se također potiče industrijska simbioza, dok kriterij socioekonomske analize govori o utjecaju na ekonomsku prihvatljivost analiziranih sustava koja se direktno očituje i na socijalnu prihvatljivost te opisuje zadovoljavanje lokalnih ciljeva.

Pošto su sami legislativni ciljevi u području gospodarenja komunalnim otpadom, koji reguliraju pitanje odvojenog skupljanja i pripreme za oporabu, zadovoljeni u svim razmatranim scenarijima, oni nisu uzeti u obzir prilikom definiranja težinskih faktora. Isto tako, utjecaji na pitanja energetske i materijalne ovisnosti nisu zasebno analizirani jer upotrjebljenim pristupom nije bilo moguće odvagati važnost dvaju suprotnih čimbenika koji su definirani na istoj, legislativnoj, razini.

Zbog prethodno navedenog, te nemogućnosti dodjeljivanja jednoznačne preferencije po pojedinim kriterijima, primarno je provedena MCDM analiza s postavljenim težinskim faktorima od 0,33 za sva tri analizirana kriterija. Rezultati ove analize za sva tri analizirana vremenska okvira, kao i ukupni rezultati, dani su kvantitativno kroz rezultate izlaznih (Φ^+) i ulaznih (Φ^-) tokova, te rezultate analize (Φ) u Tablica 47 – Tablica 50, dok je grafička usporedba rangiranja scenarija prikazana Slika 84.

Tablica 47. Kvantitativni rezultati MCDM analize – razdoblje Danas

Rang	Scenarij	Φ	$Φ^+$	$Φ^-$
1	MOsAD - K	0,3314	0,6314	0,3
2	PS - K	0,2607	0,6	0,3393
3	Plan	0,2333	0,5667	0,3333
4	EO - K	0,1993	0,5326	0,3333
5	EO - B	0,1	0,5333	0,4333
6	EO - SPP	0	0,5	0,5
7	MOsAD - B	-0,0667	0,4333	0,5
8	PS - B	-0,1667	0,4	0,5667
9	MOsAD - SPP	-0,1838	0,3743	0,5581
10	PS - SPP	-0,2	0,4	0,6
11	MO	-0,5076	0,2333	0,741

Tablica 48. Kvantitativni rezultati MCDM analize – razdoblje 2020

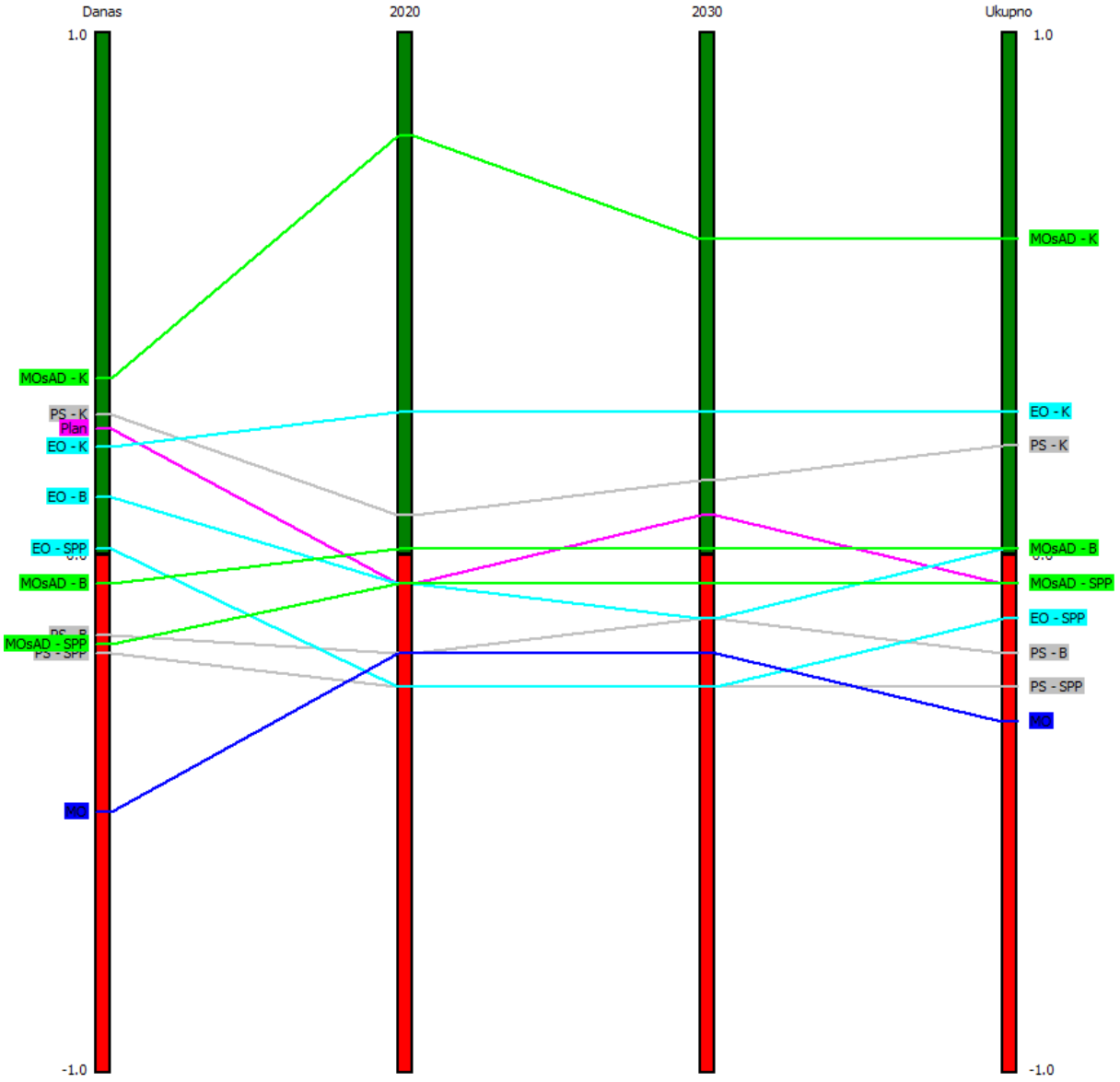
Rang	Scenarij	Φ	$Φ^+$	$Φ^-$
1	MOsAD - K	0,8	0,9	0,1
2	EO - K	0,2667	0,6333	0,3667
3	PS - K	0,0667	0,5333	0,4667
4	MOsAD - B	0	0,5	0,5
5	EO - B	-0,0667	0,4667	0,5333
6	MOsAD - SPP	-0,0667	0,4667	0,5333
7	Plan	-0,0667	0,4667	0,5333
8	PS - B	-0,2	0,4	0,6
9	MO	-0,2	0,4	0,6
10	EO - SPP	-0,2667	0,3667	0,6333
11	PS - SPP	-0,2667	0,3667	0,6333

Tablica 49. Kvantitativni rezultati MCDM analize – razdoblje 2030

Rang	Scenarij	Φ	Φ^+	Φ^-
1	MOsAD - K	0,6	0,8	0,2
2	EO - K	0,2667	0,6333	0,3667
3	PS - K	0,1333	0,5667	0,4333
4	Plan	0,0667	0,5333	0,4667
5	MOsAD - B	0	0,5	0,5
6	MOsAD - SPP	-0,0667	0,4667	0,5333
7	PS - B	-0,1333	0,4333	0,5667
7	EO - B	-0,1333	0,4333	0,5667
9	MO	-0,2	0,4	0,6
10	EO - SPP	-0,2667	0,3667	0,6333
11	PS - SPP	-0,2667	0,3667	0,6333

Tablica 50. Kvantitativni rezultati MCDM analize – ukupni

Rang	Scenarij	Φ	Φ^+	Φ^-
1	MOsAD - K	0,6	0,8	0,2
2	EO - K	0,2667	0,6333	0,3667
3	PS - K	0,2	0,6	0,4
4	MOsAD - B	0	0,5	0,5
5	EO - B	0	0,5	0,5
6	MOsAD - SPP	-0,0667	0,4667	0,5333
7	Plan	-0,0667	0,4667	0,5333
8	EO - SPP	-0,1333	0,4333	0,5667
9	PS - B	-0,2	0,4	0,6
10	PS - SPP	-0,2667	0,3667	0,6333
11	MO	-0,3333	0,3333	0,6667

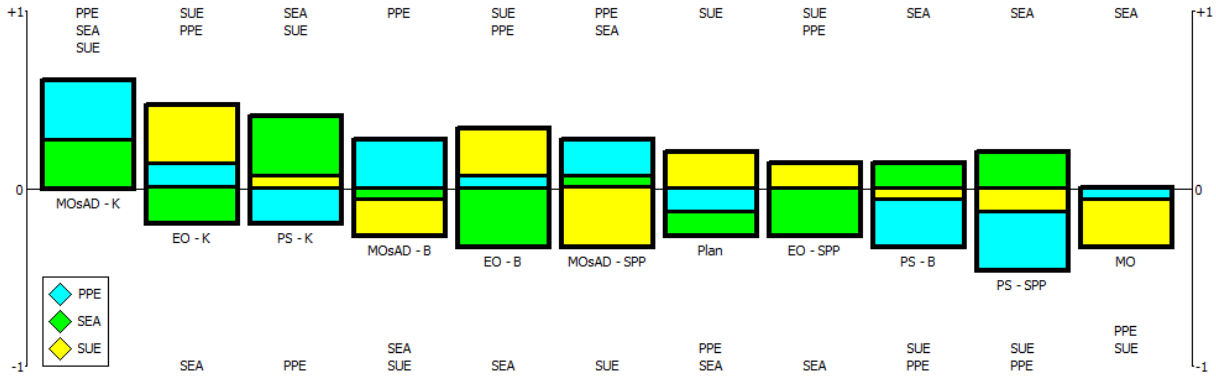


Slika 84. Grafička usporedba rangiranja scenarija

Iz prikazanih rezultata je vidljivo da scenarij *Materijalna oporaba s AD* te transformacijom proizvedenog bioplina u kogeneracijskom postrojenju ostvaruje najbolje rezultate kroz sva razmatrana razdoblja pa tako i u ukupnom rezultatu. Drugi najbolji rezultat ostvaruje scenarij *Energetska oporaba* s transformacijom proizvedenog bioplina u kogeneracijskom postrojenju dok je na trećem mjestu u rangiranju scenarij *Postojeći sustav* s kogeneracijskom proizvodnjom. Iz ovoga se vidi da veliku ulogu u ostvarenom rezultatu imaju naknadne transformacije energenata. Tako su na iduća dva mjesta opet scenariji *Materijalna oporaba s AD* te *Energetska oporaba* s transformacijom bioplina u biometan koji se injektira u plinsku mrežu.

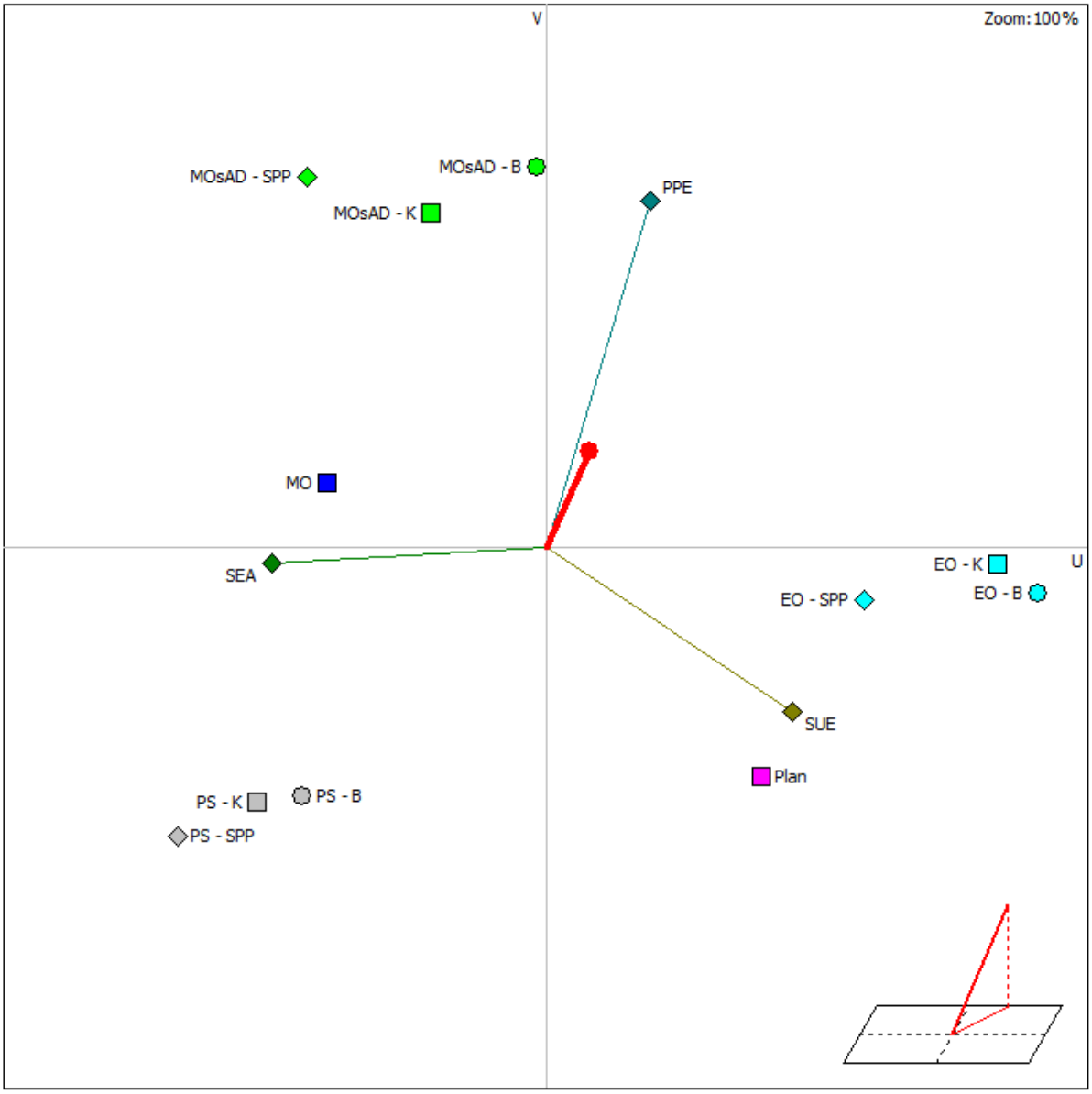
Iz rezultata se može vidjeti veliki skok u rangiranju, sa zadnjeg na prvo mjesto, scenarija *Materijalna oporaba* koji je napravljen isključivo zamjenom kompostiranja biootpada s AD. Ovo je rezultat pomaka u rangu po pojedinim kriterijima pa je tako uključenje AD omogućilo veći povrat primarne energije te skok s osmog na prvo mjesto po ukupnom povratu primarne energije. Što se tiče povećanja održivosti primarnih materijala, iako velika količina proizvedenih materijala te relativno mala energetska proizvodnja putem AD, omogućio se napredak s predzadnjeg na šesto mjesto po kriteriju smanjenja utjelovljene energije. Sa strane socioekonomske analize, zbog relativno jeftinog sustava koji ne obuhvaća velike investicije te velike proizvodnje sekundarnih sirovina koje se plasiraju na tržište, scenarij Materijalne oporabe i bez AD vrlo dobro kotira, dok je uključenje AD u sustav dovelo do porasta plasmana s petog na drugo mjesto.

Rezultati po scenarijima mogu se bolje analizirati uvidom u doprinose po kriterijima – Slika 85.



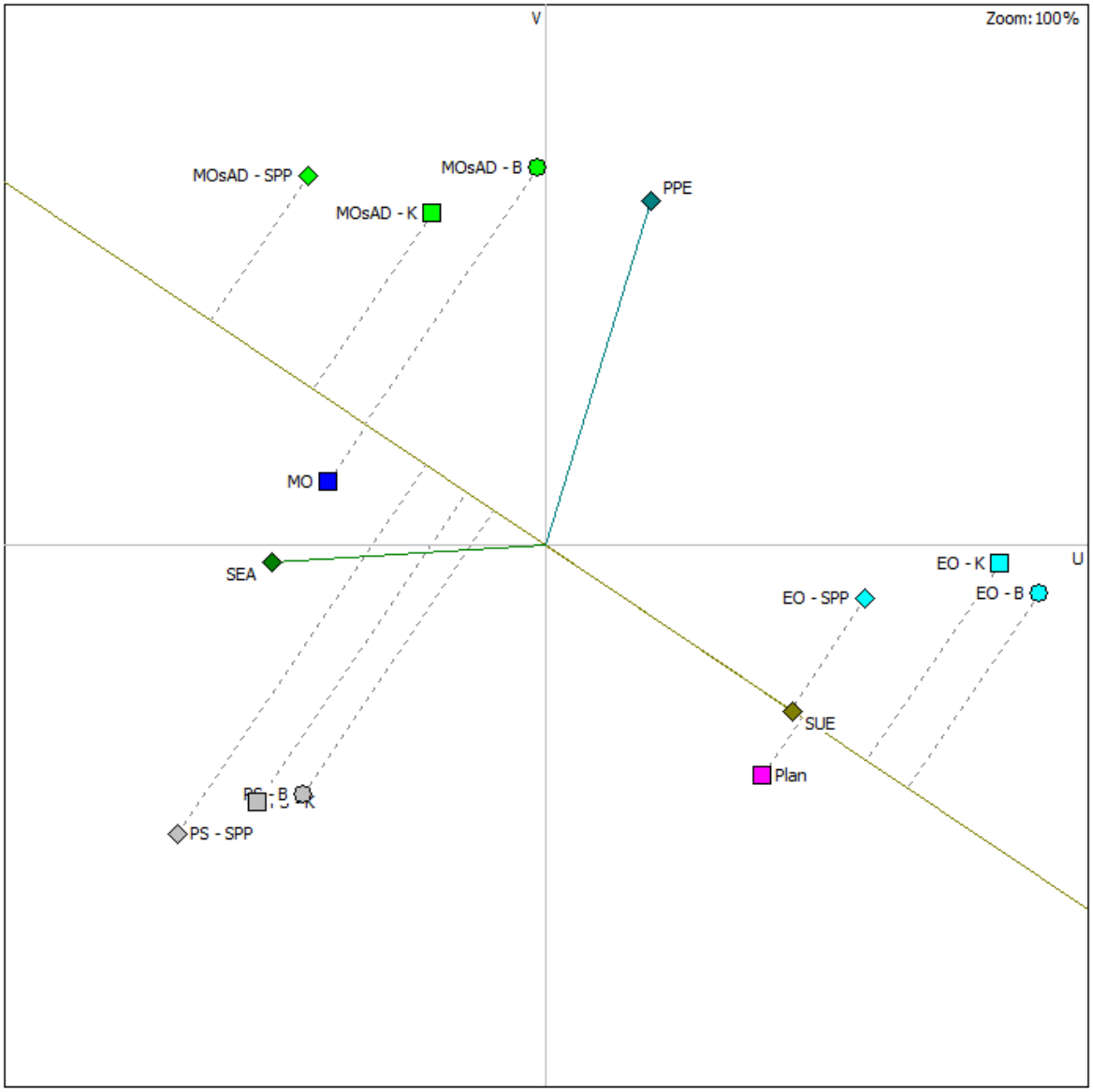
Slika 85. Doprinosi po kriterijima – ukupni rezultati

Na Slika 85, rezultati ukupnog rangiranja su poredani sukladno rezultatima prikazanih tablicom 51. – od najbolje rangiranog (lijevo) do najlošije rangiranog rezultata (desno). Prikazani rezultati pokazuju da kod svih varijanti scenarija Materijalne oporabe s AD, kriterij smanjenja utjelovljene energije ima zanemariv ili negativan utjecaj na rezultate rangiranja. Kod scenarija *Energetska oporaba* to vrijedi za kriterij socioekonomske analize, dok za *Postojeći sustav* takav utjecaj ima kriterij povrata primarne energije. Ovo je još vidljivije u GAIA prikazu – Slika 86.



Slika 86. Rezultati GAIA analize – ukupni rezultati

Iz GAIA prikaza mogu se vidjeti grupiranja rezultata kao i vrijednosti koje pojedini scenariji ostvaruju po pojedinim kriterijima. Smjer osi pojedinog kriterija označava pozitivan smjer osi, koja se produžuje i u negativnom smjeru – kako je prikazano na Slika 87, na primjeru osi kriterija Smanjenje utjelovljene energije. Projekcije pozicija rezultata pojedinih scenarija na pojedinu os pokazuju njihovu relativnu vrijednost, tj. rangiranje, po određenom kriteriju.



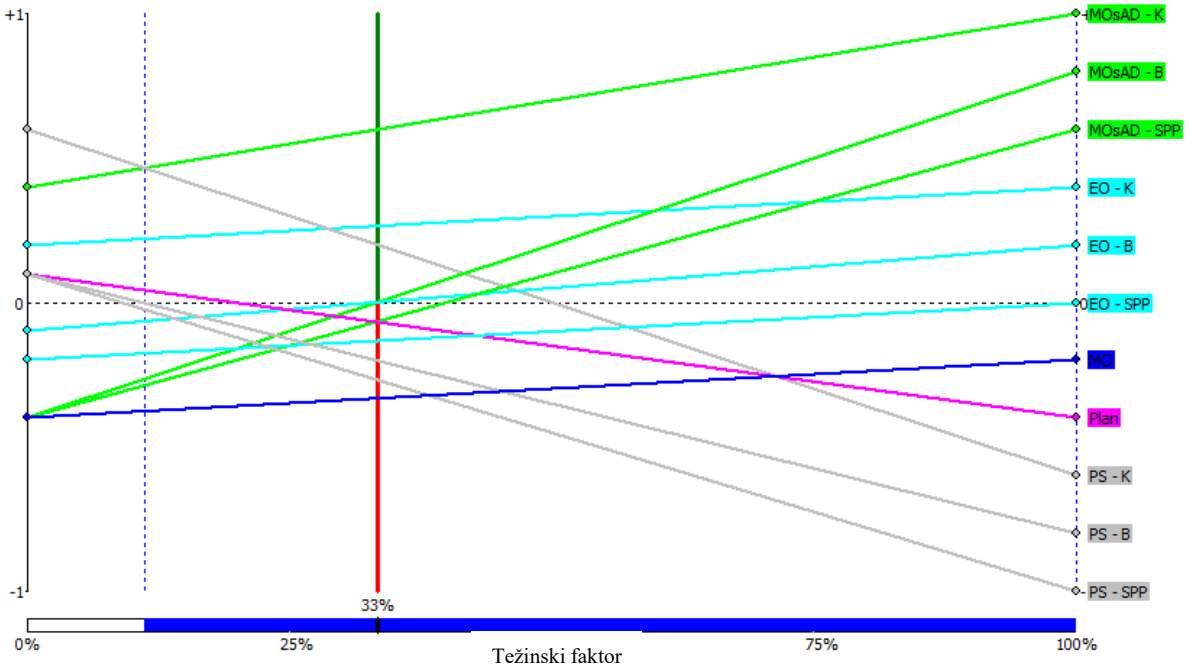
Slika 87. Objašnjenje prikaza rezultata GAIA analize

Iz prikaza rezultata ukupnog rangiranja se može vidjeti da scenariji Materijalne oporabe s AD ostvaruju malo smanjenje utjelovljene energije, scenariji Energetske oporabe ostvaruju malu vrijednost po parametru socioekonomske analize tj. uzrokuju veliki trošak za korisnike sustava, dok rezultati za sve varijante scenarija *Postojeći sustav* ostvaruju mali povrat primarne energije. S druge strane ovi scenariji ostvaruju dobre vrijednosti po pitanju drugih dvaju parametara čija se vrijednost dobije projekcijom prikaza scenarija na osi čiji je smjer prikazan vektorima kriterija. Vezano za scenarije *Materijalna oporaba* i *Plan*, oni ostvaruju visoke rezultate po jednom od kriterija dok projekcije na produžetak ostalih dvaju osi pokazuju niske vrijednosti.

Smjer vektora odluke (crveni vektor na Slika 86) prikazuje smjer optimalnih rezultata sukladno težinskim faktorima, tj. pokazuje koji su kriteriji u sukladnosti s PROMETHEE rangiranjima, a koji nisu. U rezultatima prikazanih Slika 86, smjer vektora odluke pokazuje u smjeru osi kriterija Povrat primarne energije, što govori o tome da bolje rangirani scenarij po kriteriju Povrata primarne energije će imati određenu prednost prilikom rangiranja. Međutim, pošto je vektor odluke relativno kratak, prednost je relativno mala što se vidi i iz dobivenih PROMETHEE rezultata gdje prvo mjesto zauzima scenarij *Materijalna oporaba s AD* te transformacijom proizvedenog bioplina u kogeneracijskom postrojenju, dok se na druga dva mjesta izmjenjuju rezultati iz drugih grupacija po GAIA prikazu – *Energetska oporaba* s transformacijom proizvedenog bioplina u kogeneracijskom postrojenju je na drugom, dok je na trećem mjestu scenarij *Postojeći sustav* s kogeneracijskom proizvodnjom. Promjenom težinskih faktora mijenja se samo smjer vektora odluke dok GAIA ravnina ostaje nepromijenjena. Vektor odluke može biti korišten i za analizu koji je kompromis napravljen primjenom težinskih faktora.

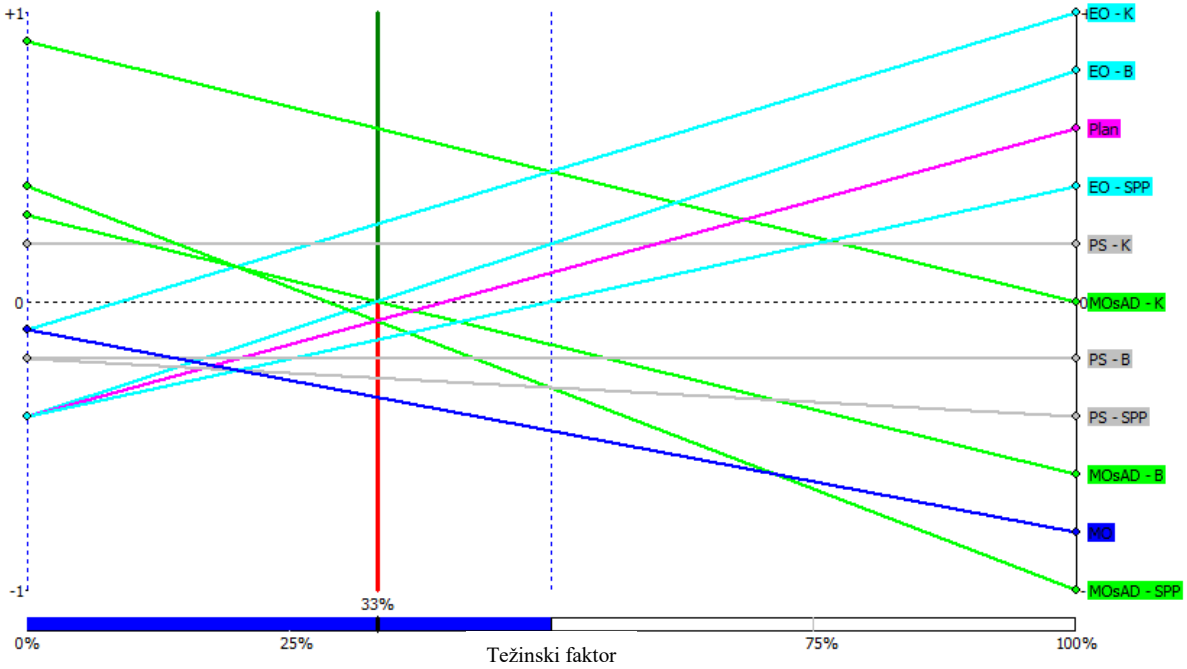
Osim toga, GAIA prikaz pokazuje da sva tri razmatrana kriterija međusobno isključuju jedan drugoga te (tj. njihove osi) pokazuju u različitim smjerovima (povlače na svoju stranu) na grafičkom prikazu. Time se dokazuje i vjerodostojnost provođenja multikriterijskog rangiranja upotrebom ovih kriterija.

Kako bi se ocijenio utjecaj promjene težinskih faktora na rezultate multikriterijskog rangiranja scenarija, napravljena je analiza osjetljivosti, koja je prikazana Slika 88 – Slika 90 te prikazuje utjecaj promjene težinskog faktora za svaki od razmatranih kriterija.



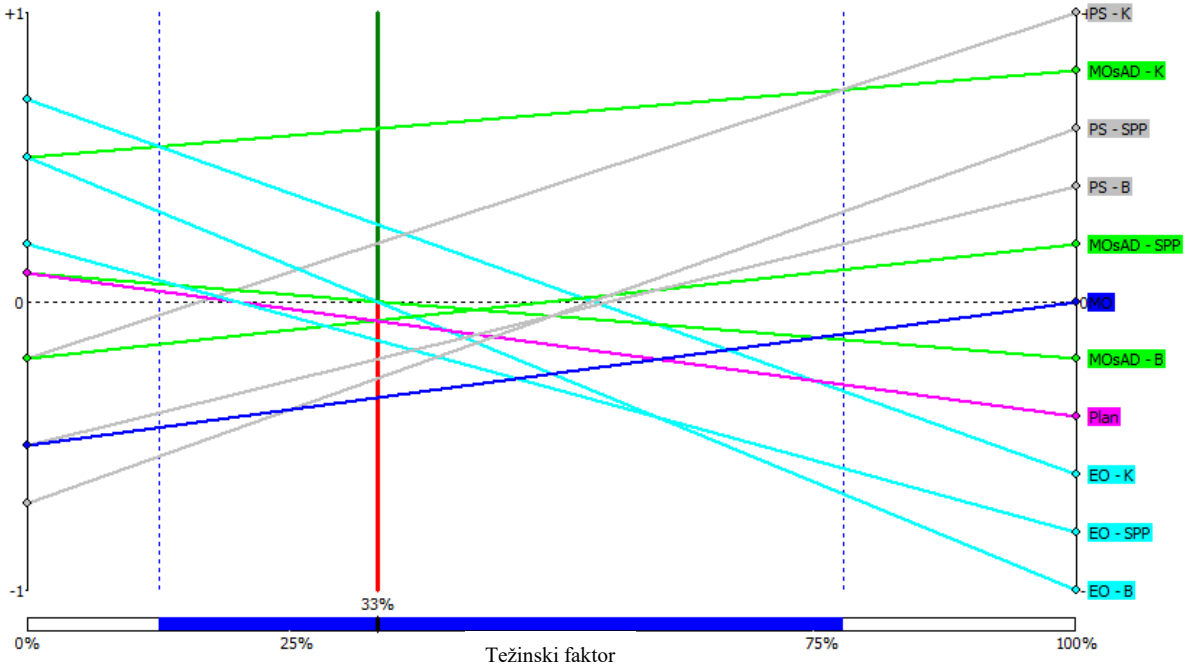
Slika 88. Analiza osjetljivosti promjene težinskog faktora za kriterij Povrat primarne energije (PPE)

Analize osjetljivosti, prikazane na Slika 88 – Slika 90, provedene su promjenom pojedinih težinskih faktora na bazi ukupnih rezultata PROMETHEE analize te za ukupni poredak scenarija. Slika 88 prikazuje analizu osjetljivosti dobivenog poretka u slučaju promjene težinskog faktora za kategoriju povrat primarne energije iz koje se može iščitati da je rangiranje prvog mjesta vrlo stabilno te do promjene dolazi samo ukoliko predmetni težinski faktor padne ispod 0,1. Kompliciranija situacija je s drugim mjestom po rangiranju kojega do vrijednosti težinskog faktora od 0,1 do 0,29 zauzima scenarij *Postojeći sustav* s kogeneracijskom transformacijom odlagališnog plina (PS – K), od 0,29 do 0,61 zauzima scenarij *Energetska oporaba* s kogeneracijskom transformacijom bioplina (EO – K) te od 0,61 zauzima *Materijalna oporaba s AD* i transformacijom proizvedenog bioplina u biometan (MOsAD – B).



Slika 89. Analiza osjetljivosti promjene težinskog faktora za kriterij Smanjenje utjelovljene energije (SUE)

Ukoliko se promatra osjetljivost promjene težinskog faktora za kategoriju smanjenja utjelovljene energije (Slika 89), situacija je nešto drugačija te do promjene na prvom mjestu ne dolazi ukoliko je iznos navedenog težinskog faktora ispod 0,5. Ova situacija također predstavlja vrlo stabilno rangiranje pošto je potrebna relativno velika promjena težinskog faktora za promjenu ranga kod prvorangiranog scenarija. Drugorangirani scenarij se ne mijenja u slučaju zadržavanja težinskog faktora u području od 0,28 do 0,5.



Slika 90. Analiza osjetljivosti promjene težinskog faktora za kriterij Socioekonomska analiza (SEA)

Kada se promatra osjetljivost na promjenu težinskog faktora za kategoriju socioekonomske analize (Slika 90), također se može vidjeti široki raspon stabilnosti rangiranja po pitanju prvorangiranog scenarija. U ovome slučaju do promjene prvorangiranog scenarija ne dolazi ukoliko se predmetni težinski faktor nalazi u području između 0,12 i 0,79. Situacija po pitanju drugoplasiranog scenarija je nešto kompliciranija te u području vrijednosti težinskog faktora između 0,12 i 0,39 drugoplasirani scenarij je *Energetska oporaba* s kogeneracijskom transformacijom bioplina (EO – K), dok u području između 0,39 i 0,79 to postaje *Postojeći sustav* s kogeneracijskom transformacijom odlagališnog plina (PS – K).

Kao što se može vidjeti iz provedenih analiza osjetljivosti na promjenu težinskih faktora, na prva dva mjesta se izmjenjuju isti scenariji (*Postojeći sustav* s kogeneracijskom transformacijom odlagališnog plina, *Energetska oporaba* s kogeneracijskom transformacijom bioplina, *Energetska oporaba* s transformacijom bioplina u biometan, *Materijalna oporaba s AD* i kogeneracijskom transformacijom bioplina te *Materijalna oporaba s AD* i transformacijom bioplina u biometan) te dobiveni rezultati analize nisu značajno osjetljivi na promjenu težinskih faktora. Stoga, ukoliko težinske faktore određuje donositelj odluke na lokalnoj razini (kojemu je važnija ekonomska održivost i socijalni mir među građanstvom) te podigne iznos težinskog faktora za socioekonomsku analizu te time i važnost ovoga kriterija,

vrlo vjerojatno neće doći do promjene prvorangiranog scenarija. S druge strane, slična je situacija ukoliko stavimo na prvo mjesto ekološka pitanja te smanjenje materijalnog i energetskog intenziteta proizvodnje, koja su zastupljena kroz kriterij povrata primarne energije, gdje povećanjem težinskog faktora na 100% ne dolazi do promjene prvorangiranog rješenja. Ukoliko se težište stavi na razvoj gospodarstva EU kroz kružno gospodarstvo i promoviranje industrijske simbioze, koji su analizirani kroz kriterij smanjenja utjelovljene energije, do promjene prvorangiranog scenarija dolazi samo u slučaju da se navedeni kriterij ocijeni težinskim faktorom većim od 0,5.

7. ZAKLJUČAK

Politika Europske unije prema problemu otpada i njegovog zbrinjavanja definira okvire unutar kojih se uz predmetni problem istovremeno nastoje olakšati i drugi problemi s kojima je suočena, poput problema ovisnosti o uvozu sirovina i energenata te pritiska na okoliš, nastalog zbog velikog rasta europskog gospodarstva posljednjih desetljeća. Glavni pristup rješavanju navedenih problema obuhvaća transformaciju postojećeg gospodarstva u niskougljično, kompetitivno i resursno efikasno gospodarstvo.

Jedan od integralnih pristupa ovim problemima je definiran kroz kružno gospodarstvo i koncept "zatvaranja petlje" gdje se nastoji sačuvati materijalnu i gospodarsku vrijednost sirovina unutar europske ekonomije što je duže moguće. Države članice na različite načine pokušavaju pristupiti ovom problemu integracije navedenog pristupa u svoje nacionalno zakonodavstvo te su propisale ciljeve koje je potrebno ispuniti u području skupljanja otpada i njegove materijalne oporabe. Međutim, kružno gospodarstvo je širok pojam koji se ne mora gledati strogo s materijalne točke gledišta. Postoje i drugi pristupi ovome problemu, gdje je najrašireniji energetska oporaba otpada koja se može razmatrati kao alternativa materijalnoj oporabi. Međutim, u ovom se radu željelo pokazati da integracija ovih dvaju pristupa čini jedan jedinstveni pristup za uspostavu kružnog gospodarstva u kojemu se postiže „zatvaranje petlje“ s obje strane – materijalne i energetske. Kroz ovakav višedimenzijski pristup omogućava se međudjelovanje te se uspostavlja sinergija koja rezultira sveukupno boljom održivosti ovakvih sustava.

Unutar postavljenih legislativnih okvira, države članice Europske unije, kao i donositelji odluka na lokalnim razinama, moraju odlučiti u kojem smjeru nastaviti razvoj sustava gospodarenja komunalnim otpadom. Ovo je još veći problem za donositelje odluka u mlađim zemljama članicama EU koje trebaju nadoknaditi zaostatke za starijim članicama te stoga mogu očekivati velike promjene u sastavu i količini otpada u kratkom vremenu. Uz postavljene ciljeve s razine EU, nositeljima odluka na lokalnoj razini veliku ulogu igra i pitanje ekonomske održivosti sustava koje predstavlja najznačajniji aspekt za lokalne i regionalne samouprave. Ovo pitanje je dodatno naglašeno pošto na sebe veže i pitanje socijalne prihvatljivosti koje je vrlo važno za donositelje odluka izabrane od strane građana, koji u isto vrijeme i financiraju razmatrani sustav kroz plaćanje naknade za zbrinjavanje otpada.

Zbog velikog spektra ciljeva koje se nastoji zadovoljiti, potrebno je provesti multikriterijsku analizu koja uzima u obzir sve značajne parametre koji opisuju zadovoljavanje predmetnih ciljeva. Zbog kompleksnosti donošenja odluke koja uključuje veliki broj parametara kako bi se uzeli u obzir svi zadani ciljevi, napravljene su analize i izvedeni rezultirajući jednovrijednosni indeksi koji obuhvaćaju veći broj pitanja te stoga omogućavaju rangiranje po većem boju ciljeva, čime se smanjuje broj pojedinačnih kriterija koje je potrebno sagledati. Na ovaj način se olakšava donošenje odluka u pogledu planiranja razvoja razmatranih sustava. Predmetne analize su provedene nad scenarijima koji opisuju mogući put razvoja sustava gospodarenja komunalnim otpadom te njegove oporabe, koji obuhvaćaju sve lokalno (legislativno i planski) identificirane tehnologije, dok su sastavi i količine otpada prognozirani na bazi širokog spektra socioekonomskih parametara. Navedena prognoza provedena je unutar granica postavljenih Direktivom o odlaganju otpada, Okvirnom direktivom o otpadu i Akcijskim planom o kružnom gospodarstvu.

Prva takva analiza je analiza utjecaja putem CED indikatora. CED pristup je identificiran kao dobar alat za donošenje odluka i odabir ekološki prihvatljivijih alternativa te predstavlja indikator za procjenu utjecaja na okoliš kao i procjenu ukupnih rezultata procjene životnog ciklusa (LCA). Ovaj pristup omogućuje jednostavnu ocjenu rezultata ekološkog utjecaja i održivosti sustava gospodarenja otpadom, dok jednovrijednosni karakter CED indikatora pojednostavljuje usporedbu različitih scenarija.

Točnost rezultata i mogućnost njihovog korištenja za procjenu ukupnog utjecaja na održivost osigurana je korelacijom CED indikatora s drugim složenijim i široko korištenim jednovrijednosnim LCA pokazateljima koji se redovito koriste kao dio LCA analiza. Stoga ovakva analiza predstavlja adekvatan alat za jednovrijednosnu ocjenu utjecaja na okoliš, kao i na iskorištavanje ionako skromnih sirovinskih resursa s kojima EU raspolaže – što rezultira i utjecajem na ovisnost o njihovom uvozu. Također, CED je energetski pokazatelj što ga čini vrlo prigodnim za procjenu održivosti integracije sustava gospodarenja otpadom i energetskih sustava. Na temelju ovakvog pristupa izračunan je faktor povrata primarne energije (*Primary Energy Return* (PER) faktor) koji pokazuje neto količinu oporabljene primarne energije kroz materijalnu i energetsku oporabu.

Rezultati analize putem PER faktora pokazali su da je scenarij temeljen na energetskoj oporabi (scenarij *Energetska oporaba*) vratio veću količinu primarne energije natrag u gospodarstvo u

odnosu na scenarij baziran isključivo na materijalnoj oporabi (scenarij *Materijalna oporaba*). Međutim, prilikom zamjene tehnologije kompostiranja, u scenariju *Materijalna oporaba*, s alternativnom tehnologijom obrade biootpada putem AD, dobiva se scenarij *Materijalna oporaba s AD*, koji pokazuje najbolje rezultate od svih razmatranih scenarija. Također, ovaj scenarij riješio je problem komunalnog otpada bez izgradnje posebnog postrojenja za TOO. S druge strane, izgradnja postrojenja za TOO učinila je primjenu AD u urbanim područjima lakšom, pošto TOO predstavlja jedan od načina za zbrinjavanje AD mulja te stoga ne treba tražiti druge načine za plasiranje odnosno zbrinjavanje digestata što uvelike smanjuje logističke probleme, ali i probleme s mogućim prihvaćanjem alternativnih rješenja od strane javnosti (poput mogućih problema s reakcijom javnosti zbog korištenja digestata na poljoprivrednim površinama). Usporedbom rezultata primjene različitih tehnologija, također je vidljivo da kompostiranje u svim scenarijima predstavlja ponor primarne energije. Iz navedenog se može zaključiti da se najbolji rezultati ostvaruju kombiniranjem materijalne i energetske oporabe komunalnog otpada.

Iako su sva postrojenja za prikupljanje, sortiranje i energetsku oporabu lokalno pozicionirana (unutar granica razmatranog sustava – grada), ovakav sustav gospodarenja komunalnim otpadom te njegove oporabe se ne može smatrati lokalnim jer zahtijeva sudjelovanje postrojenja za proizvodnju materijala (materijalnu oporabu) i cementare (za termičku obradu gorivog dijela otpada) koje su u većini slučajeva smještene izvan grada. Međutim, implementacijom ovakvih tehnologija u sustav mogao bi se riješiti problem otpada na širem području putem izgradnje distribuiranih objekata za gospodarenje otpadom (kao što su objekti za skupljanje i sortiranje otpada) te korištenjem centraliziranih postrojenja za konačni korak obrade otpada (oporabe) što bi, prema rezultatima, činilo najodrživiji sustav s aspekta povrata primarne energije.

Korak dalje u analizi je napravljen definiranjem indeksa PERI (*Primary Energy Return Index*) koji iskazuje udio povrata primarne energije iz otpadnih materijala. Sveukupni rezultati analize indeksom PERI pokazuju da sustav gospodarenja komunalnim otpadom, kroz kombiniranu materijalnu i energetsku oporabu otpada, može vratiti u gospodarstvo do 50% resursa koji su ušli u sustav gospodarenja otpadom u obliku otpadnih materijala (izraženo u obliku PE), što predstavlja veliki dio prethodno odbačenih sirovina čija se gospodarska vrijednost na ovaj način, u nekom obliku, zadržava unutar gospodarstva. Osim toga, indeksom PERI pokazano je da povećanje učinkovitosti odvajanja primarnog otpada dovodi do značajnog povećanja povrata primarne energije samo do određene točke nakon čega se mogu očekivati zanemarivi doprinosi

povećanja primarne separacije. Pozicija te točke ovisi o implementiranom sustavu gospodarenja otpadom. Nakon dostizanja ove vrijednosti povećanje primarne separacije ne dovodi do daljnjeg (značajnijeg) rasta indeksa PERI te kako bi se dodatno povećala ekološka prihvatljivost sustava, moraju se uvesti strukturalne promjene, poput implementacije i primjene novih tehnologija.

Kada se usporede različite tehnologije putem indeksa PERI, vidljivo je da dva vrlo različita sustava gospodarenja otpadom mogu doseći istu razinu povrata primarne energije tj. energetske održivosti. Hoće li doći do toga, u velikoj mjeri ovisi o sastavu i količini pojedinih frakcija otpada u ukupnom komunalnom otpadu. Zbog toga se sustavi gospodarenja komunalnim otpadom ne mogu samo kopirati iz drugih zemalja bez razmatranja razlika u sadašnjim i očekivanim količinama i sastavu prikupljenih otpadnih materijala. Ovdje veliku ulogu ima zakonodavstvo te prihvaćanje sustava primarne separacije otpada u društvu koje direktno utječu na sastav i količine proizvedenog komunalnog otpada i njegovih frakcija. Smanjenje količina pojedinih skupljenih frakcija otpada, pod utjecajem politike prevencije generiranja otpada, može značajno utjecati na rezultate (npr. smanjenje količine otpada od hrane zbog mjera prevencije generiranja te vrste otpada). Slijedom navedenog, može se zaključiti da su praćenje generiranja otpada i prognoze prikupljanja otpada po frakcijama ključne za održivo planiranje i donošenje odluka vezanih uz planiranje sustava gospodarenja otpadom.

Budući da su proizvedeni energetski vektori dio energetskih sustava, integracija ovih sustava rezultira djelomičnim prijelazom s primarnih goriva na goriva iz otpada. Tako, ovisno o transformacijama bioplina, navedeni sustavi utječu na centralizirani toplinski sustav, elektroenergetski sustav, sustav dobave prirodnog plina te transportni sustav. Najbolje rezultate ostvaruje se kogeneracijskom proizvodnjom vezanom na toplinski i elektroenergetski sustav. Nadalje, proizvedeni energetski vektori se, posredstvom energetskih sustava, mogu koristiti kao ulazni energetski tok za pogon postrojenja u samome lancu gospodarenja i oporabe otpada, što čini korak dalje u konceptu "zatvaranja petlje". Ovom mišlju je definirana druga analiza korištena u ovome istraživanju, analiza održivosti temeljena na analizi utjecaja na utjelovljenu energiju (*embodied energy (EE)*) proizvedenih materijala..

Rezultati pokazuju da razvoj sustava u smjeru energetske oporabe otpada (scenariji *Plan* i *Energetska oporaba*) može dovesti do zadovoljenja između 47% i 73% ukupnih energetskih potreba čitavog lanca gospodarenja otpadom i njegove oporabe, koji udovoljava svim,

legislativom nametnutim, ciljevima oporabe materijala. Ove vrijednosti ovise o karakteristikama sustava i učinkovitosti primarne separacije otpada. Rezultati praćenja masenih tokova pokazuju da, u vremenskom razdoblju 2030., 55% ukupnog skupljenog otpada, oporabljenog u postrojenjima koji kao izlaz daju energetske vektore (32% u postrojenje za anaerobnu digestiju, a ostatak u postrojenje za termičku obradu otpada), može zadovoljiti 59% ukupnih energetskih potreba cijelog sustava, a istodobno zadovoljava i sve ciljeve glede oporabe materijala. Također unutar sustava *Materijalna oporaba s AD*, koji pokazuje visoku energetsku potrošnju i materijalnu proizvodnju, samo kroz AD može se pokriti do 35% ukupnih energetskih potreba. U tom smislu, energetska oporaba otpada uistinu pomaže pri "zatvaranju petlje" u konceptu kružnog gospodarstva.

Ukoliko se gledaju zamjene pojedinih (primarnih) energenata, bolji se rezultati postižu pokrivanjem potreba za prirodnim plinom ili transportnim gorivom u potrošnji razmatranog sustava. Međutim, pošto samo manji dio tih energetskih vektora biva potrošen unutar analiziranog sustava, ukupno se najbolji rezultati postižu prilikom transformacije proizvedenog bioplina u kogeneracijskim postrojenjima u električnu i toplinsku energiju – energetske vektore koji se koriste u većem broju postrojenja.

Na osnovi dobivenih rezultata o zadovoljavanju energetskih potreba po pojedinim energetskim vektorima, napravljena je analiza održivosti temeljena na analizi smanjenja utjelovljene energije. Ovaj pristup predstavlja razumljiv alat za ocjenu utjecaja analiziranog sustava na kružno gospodarstvo putem poticanja simbioze među industrijama što također predstavlja jedan od ciljeva naglašenih europskom legislativom.

Iz rezultata je vidljivo da recikliranje otpadnih materijala, tj. upotreba sekundarnih sirovina dobivenih iz otpada u materijalnoj proizvodnji, može značajno smanjiti utjelovljenu energiju analiziranih sekundarnih materijala i to za 63% do 74%. Iako navedeni postotci predstavljaju veliko smanjenje, ono se može još dodatno povećati ponovnim korištenjem energije iz otpada za pogon razmatranih sustava. Dodatno smanjenje utjelovljene energije recikliranih materijala zbog korištenja oporabljene energije iz otpada za pokrivanje energetskih potreba analiziranih sustava kreće se u rasponu od 16% do 67% ovisno o analiziranom sustavu i analiziranom vremenskom okviru.

Najveća dodatna smanjenja utjelovljene energije izračunana su za današnje stanje s niskom stopom primarne separacije te stoga i manjom materijalnom proizvodnjom. Međutim, današnje

stanje predstavlja samo trenutačnu poziciju koju je potrebno vrlo brzo promijeniti. Kada se promatraju druga dva vremenska razdoblja, dodatno smanjenje utjelovljene energije iznosi do 31%/37%/59%/41% (za scenarije *Postojeći sustav*/*Plan*/*Energetska oporaba*/*Materijalna oporaba*). Ovi postotci predstavljaju vrlo dobre rezultate uzimajući u obzir da je naglasak na materijalnoj oporabi, koja proizlazi iz smjernica europskog zakonodavstva. Kombiniranjem dobivenih rezultata po pitanju smanjenja utjelovljene energije kroz materijalnu i energetsku oporabu otpada, ukupna redukcija utjelovljene energije recikliranog materijala doseže 63% - 87%. Prethodno izneseni rezultati izračunani su za varijantu korištenja bioplina u kogeneracijskom postrojenju. Kada se pogledaju rezultati za ostale dvije varijante, može se uočiti dodatno smanjenje utjelovljene energije samo u slučaju scenarija *Energetska oporaba* i to za vremensko razdoblje Danas gdje zbog male potražnje za električnom i toplinskom energijom diversifikacija energetskog portfelja dovodi do zadovoljenja većeg ukupnog energetskog konzuma. U ostalim scenarijima, dodatno smanjenje je bitno manje zbog puno veće potražnje sustava za električnom i toplinskom energijom. Komentirani rezultati govore o zadovoljenju određenih ciljeva na višoj razini, dok, što se tiče lokalne razine, ciljevi donositelja odluka su više orijentirani na ekonomsku održivost investicije te njen utjecaj na socijalno prihvaćanje.

Korištenje LCA okvira za kreiranje scenarija analiziranih sustava može biti zanimljivo lokalnim donositeljima odluka, jer predstavlja jednu od robusnih platformi za donošenje odluka koja prati sve otpadne, materijalne i energetske tokove. Izračunani podaci o navedenim tokovima mogu se jednostavno koristiti s ekonomskim podacima za razmatrane tehnologije za izračunavanje troškova sustava te s tržišnim cijenama produkata za izračunavanje prihodovne strane. Rezultati pokazuju da postoje značajne vremenski ovisne promjene troškova i prihoda za analizirane sustave u razmatranom vremenskom okviru. Sa socioekonomskog gledišta, svaka promjena u složenom sustavu kao što je sustav gospodarenja otpadom dovodi do novog troška kojega plaćaju korisnici sustava tj. građani kroz naknadu za odvoz i zbrinjavanje otpada po količini miješanog (nerazvrstanog) komunalnog otpada.

Iz rezultata se može zaključiti da niti jedan scenarij nema manje troškove sustava od postojećeg scenarija, odnosno, manji su jedino kod scenarija *Materijalna oporabe s AD* i to samo u slučaju smanjenja naknade za termički tretman GIO u cementari ispod 37 €/t. Iako se u zadanim uvjetima čini da bi *Postojeći sustav* bio najbolji zbog najnižeg troška pogona, te u teoriji zadovoljava legislativne ciljeve po pitanju zbrinjavanja komunalnog otpada zbog primarne

separacije, ovaj sustav jednostavno ne zadovoljava sa stajališta brzine implementacije, pošto za uvođenje visokih stupnjeva primarne separacije kod korisnika sustava treba puno vremena za dizanje svijesti, a bez toga nije moguće ispuniti Direktivu o odlaganju otpada. Diskutirani rezultati su rezultati za varijantu kogeneracijske transformacije proizvedenog bioplina, dok rezultati ostalih varijanti pokazuju povećanje troškova sustava.

Rezultati pokazuju da uvođenje TOO u sustav automatski rezultira velikim povećanjem troškova sustava, što je posljedica velikog investicijskog troška, međutim navedena tehnologija istovremeno proizvodi i najveću količine energije za pokrivanje energetskih potreba sustava. S druge strane, energija dobivena iz bioplinskog postrojenja u sklopu AD biootpada smanjuje troškove sustava u svim scenarijima gdje je uvedena. Od svih razmatranih scenarija, scenarij *Materijalna oporaba s AD*, uz scenarij *Postojeći sustav*, pokazuje najbolje rezultate, dok ostali scenariji rezultiraju većim rastom troškova za građane, dok najveće povećanje uzrokuje scenarij *Energetska oporaba*.

Iako se kroz kreiranje metodologije za prethodno navedene analize i rezultirajućih pokazatelja smanjio broj potrebnih veličina na bazi čijeg rangiranja bi se provodilo donošenje odluke te se već iz prethodno prezentiranih rezultata može zaključiti koji scenariji su pogodniji s europskog stajališta, ali i sa stajališta jedinica lokalne i područne samouprave, analizirani scenariji su dodatno rangirani kroz pristup multikriterijskog donošenja odluka kako bi se olakšalo jednoznačno donošenje odluke. Stoga je u ovome istraživanju korištena PROMETHEE II metoda za multikriterijsko donošenje odluka.

Iz rezultata je vidljivo da scenarij *Materijalna oporaba s AD* pokazuje najbolje, kako ukupne rezultate, tako i rezultate po svim razmatranim razdobljima, dok drugo i treće mjesto zauzimaju scenariji *Energetska oporaba* te *Postojeći sustav*. Dok scenarij *Materijalna oporaba s AD* pokazuje veliku prednost, razlika između rezultata ostalih scenarija je dosta manja. Valja uočiti da su sva tri prvorangirana rezultata za varijantu kogeneracijske proizvodnje što govori o većoj važnosti električne i toplinske energije u odnosu na druge vrste energetskih nositelja.

Usporedbom rezultata rangiranja vidljivo je da izbjegavanje energetske oporabe vodi k ukupno lošijim rezultatima – scenarij koji izbjegava energetsku oporabu (scenarij *Materijalna oporaba*) pokazuje ukupno najlošije rezultate te u rangiranju zauzima zadnje mjesto. Analizom ukupnih rezultata po pojedinim kriterijima (analizama) vidljivo je da scenarij *Materijalna oporaba* omogućava veći povrat primarne energije samo od scenarija *Postojeći sustav* te je (po

rezultatima indeksa PERI) na razini scenarija *Plan* i *Energetska oporaba* varijanta transformacije bioplina u SPP (uočena je razlika na razini od samo 1%). Međutim, ovaj rezultat bi bio još lošiji ukoliko bi se iz tog scenarija u potpunosti izbacila energetska oporaba otpada, koja je u scenarij *Materijalna oporaba* integrirana u obliku termičke obrade ostatnog gorivog otpada iz procesa MBO u cementarama, čime se u procesu proizvodnje cementa zamjenjuje ugljen koji se koristi kao primarno gorivo. Po pitanju smanjenja utjelovljene energije proizvedenih materijala (u odnosu na primarnu proizvodnju materijala), izbjegavanje energetske oporabe dovodi scenarij *Materijalna oporaba* na posljednje mjesto od svih analiziranih scenarija i varijanti. Prema tome, iako se po tom scenariju proizvodi više sekundarnih materijala u odnosu na druge scenarije, proizvedeni materijali imaju veću utjelovljenu energiju, tj. njihova proizvodnja je manje održiva (zahtjeva veći utrošak primarne energije). S treće strane, socioekonomska analiza pokazuje bolje rezultate rangiranja od svih scenarija koji naglašavaju energetsku oporabu (scenariji *Plan* i *Energetska oporaba*) bez obzira o kojoj se varijanti radi tj. iziskuje manje financiranja od strane korisnika sustava, čime se smanjuje mogući negativni socijalni utjecaj.

Provedena GAIA analiza potvrđuje ispravnost odabira korištenih kriterija, tj. odluku korištenja upravo ovih triju parametara za analizu sustava gospodarenja komunalnim otpadom, budući da sva tri razmatrana kriterija međusobno isključuju jedan drugoga tj. da njihove osi pokazuju u suprotne smjerove i nalaze se u različitim kvadrantima 2D ravnine. Ovime je dokazana i vjerodostojnost dobivenih rezultata rangiranja.

Vjerodostojnost rangiranja scenarija je preispitana i korištenjem analize osjetljivosti koja pokazuje visoku stabilnost rangiranja kada je u pitanju prvorangirano rješenje, u ovisnosti o promjeni težinskih faktora za sva tri kriterija. Analizom provedenom na bazi iznesene metodologije može se ocijeniti opravdanost energetske oporabe otpada te korištenja energije iz otpada kao lokalnog energenta u vremenu legislativnih promjena, ne samo po pitanju zbrinjavanja otpada, nego i daljnjeg razvoja europskog gospodarstva. Ovim zaključkom je potvrđena hipoteza ovoga istraživanja.

Iz legislativnog okvira koji opisuje kružno gospodarstvo, kao i prethodno objavljenih radova, vidljivo je da se naglasak usmjerava na recikliranje i smanjenje iskorištavanja materijalnih sirovina. Energetski tokovi su zanemareni ili se promatraju samo kroz mogućnost prijelaza na korištenje obnovljivih izvora energije ili kroz smanjenje energetske potrošnje putem mjera

energetske učinkovitosti, dok se energetska oporaba razmatra kao jedna od analiziranih opcija odvojeno od materijalne oporabe. To nije slučaj kada se promatra cijeli sustav gospodarenja otpadom i njegove oporabe, gdje se otpad paralelno može koristiti kao materijalna i energetska sirovina te se ova dva pristupa mogu nadopunjavati. Rezultati pokazuju da ovakav cjeloviti pogled na problem otpada i njegove oporabe pokazuje najbolje rezultate. Kroz ovo istraživanje identificirana je nova veza između energetske i materijalne oporabe otpada, kroz povratnu petlju koja omogućuje povećanje održivosti proizvedenih (recikliranih) materijala smanjenjem korištenja primarnih izvora energije.

Slijedom toga, predmetno istraživanje, ne samo da omogućava bolje razumijevanju uloge energije iz otpada kroz kvantificiranje utjecaja „zatvaranja petlje“ na energetskoj strani putem srednjoročne energetske analize alternativnih scenarija, nego i dodatno proširuje pogled analize na utjecaj na ukupnu održivost (ekološku, širu gospodarsku i socioekonomsku) predmetne odluke donesene na bazi ovog novog pristupa čime predstavlja jedan cjeloviti pristup razmatranju cijelog spektra problema koje je potrebno uzeti u obzir prilikom planiranja ovakvih, integriranih, sustava. Tako dobiveni rezultati naglašavaju važnost integrirane analize otpada i energetskih sustava (i njihove međusobne povezanosti) te pokazuju da energija iz otpada ima svoju ulogu u kružnom gospodarstvu pretežno orijentiranom prema materijalnoj oporabi.

Kada se primjenjuje višekriterijski pristup prilikom analize sustava, potrebno je obratiti pažnju na broj kriterija koji se uzimaju u obzir kako ne bi došlo do nesigurnosti u konačnu odluku. Broj kriterija koji se uzimaju u obzir može se smanjiti vođenjem računa o tome prilikom njihovog definiranja te naposljetku korištenjem kriterija s izraženom međuovisnosti (kolinearnosti) s većim brojem značajnih faktora, čime se pojednostavljuje cijeli proces donošenja odluke.

Iz prethodnih rezultata i iznesene diskusije jasno se može iščitati uloga energetske oporabe otpada u kružnoj ekonomiji i konceptu „zatvaranja petlje“. Dok na jednoj razini omogućuje povećanje povrata primarne energije te time smanjenja utjecaja na okoliš, kao i ovisnosti o uvozu sirovina, na drugoj razini pomaže u „zatvaranju petlje“ u kružnom gospodarstvu te promovira simbiozu među industrijskim granama, čime se direktno povećava održivost materijalne oporabe i proizašlih proizvoda. Na trećoj razini omogućava ekonomsku i socijalnu održivost implementacije promjena u sustavima gospodarenja otpadom i njegove oporabe na

lokalnoj razini, čime se zapravo i omogućuje novijim zemljama članicama EU da doprinesu širem europskom stremljenju prema transformaciji postojećeg gospodarstva u niskougljično, kompetitivno i resursno efikasno gospodarstvo u okviru koncepta kružnog gospodarstva i „zatvaranja petlje“. Ovo istovremeno predstavlja i sažetak odgovora na istraživačko pitanje postavljeno u ovom doktorskom istraživanju.

8. POPIS LITERATURE

[1] European Commission. Eurostat. Production in industry 2018 (online data codes: sts_inpr_m). 2018. Available from: http://ec.europa.eu/eurostat. [accessed: 31.08.2018.]

[2] European Environment Agency. SOER 2010 Material resources and waste - 2012 update. Denmark, Copenhagen: 2012. Available from: https://www.eea.europa.eu/publications/material-resources-and-waste-2014 [accessed: 31.08.2018.]

[3] European Comission. Eurostat. Energy, transport and environment indicators 2017. 2017. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/8435375/KS-DK-17-001-EN-N.pdf/18d1ecfd-acd8-4390-ade6-e1f858d746da [accessed: 02.10.2018.]

[4] European Commission. Eurostat. Material flow accounts per capita (online data codes: env_ac_mfa, demo_gind). 2018. Available from: http://ec.europa.eu/eurostat.

[5] European Commission. Reducing the EU's dependency on raw materials: European Innovation Partnership launched 2013. 2013. Available from: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-92_en.htm. [accessed: 02.10.2018.]

[6] European Commission. Communication From the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee Of The Regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU. 2017. Available from: https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/EN/COM-2017-490-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF [accessed: 07.10.2018.]

[7] European Commission. Eurostat. Material flow accounts (online data codes: env_ac_mfa). 2018. Available from: http://ec.europa.eu/eurostat. [accessed: 07.10.2018.]

[8] Doris Schüler, Stefanie Degreif, Peter Dolega, Diana Hay, Andreas Manhart, Matthias Buchert. European Policy Brief. STRADE project. 2017. Available from: http://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADEPolBrf_02-2017_RawMaterialFlows_Mar2017_FINAL.pdf [accessed: 09.10.2018.]

[9] European Commission. Eurostat. Simplified energy balances - annual data (online data codes: nrg_100a). 2018. Available from: http://ec.europa.eu/eurostat.

[10] European Comission. Eurostat. Energy trends. 2018. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_trends [accessed: 09.10.2018.]

[11] European Commission. Eurostat. Energy dependence (online data codes: t2020_rd320). 2018. Available from: http://ec.europa.eu/eurostat. [accessed: 09.10.2018.]

[12] European Comission - Eurostat. From where do we import energy and how dependent are we? Shedding light on energy in the EU. 2018. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html. [accessed: 09.10.2018.]

[13] European Parlament. Waste management in the EU: infographic with facts and figures. 2018. Available from: http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180328STO00751/eu-waste-management-infographic-with-facts-and-figures [accessed: 09.10.2018.]

[14] European Comission. Environment – Waste. 2018. Available from: http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm [accessed: 10.10.2018.]

[15] European Comission. Eurostat. Waste statiscitcs. 2018. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics [accessed: 14.10.2018.]

[16] European Commission. Eurostat. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. 2018 (online data codes: sts_inpr_m). Available from: http://ec.europa.eu/eurostat. [accessed: 05.10.2018.]

[17] European Environment Agency. Urban Environment. 2017. Available from: https://www.eea.europa.eu/themes/urban/intro. [accessed: 02.10.2018.]

[18] UN-Habitat. Energy 2014. Available from: https://unhabitat.org/urban-themes/energy/. [accessed: 02.10.2018.]

[19] European Commission. Cities. 2009. Available from: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/paris_protocol/cities_en [accessed: 02.10.2018.]

[20] European Comission. Eurostat. Municipal waste by waste management operations (online data codes: env_wasmun). 2018. Available from: http://ec.europa.eu/eurostat. [accessed: 16.10.2018.]

[21] European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council - The raw materials initiative : meeting our critical needs for growth and jobs in Europe {SEC(2008) 2741}. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52008DC0699 [accessed: 03.10.2016.]

[22] European Commission. The European Innovation Partnership (EIP) on Raw Materials. Available from: https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/content/european-innovation-partnership-eip-raw-materials [accessed: 03.10.2016.]

[23] European Commission. Inovation Union. Available from: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/goals-research-and-innovation-policy/innovation-union_hr [accessed: 05.10.2016.]

[24] European Environment Agency. A resource efficient Europe-flagship initiative under the Europe 2020 strategy. Available from: https://www.eea.europa.eu/policy-documents/a-resource-efficient-europe-flagship [accessed: 05.10.2016.]

[25] European Commission. EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth /* COM/2010/2020 final */. 2010. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52010DC2020 [accessed: 03.10.2016.]

[26] European Council. A NEW EUROPEAN STRATEGY FOR JOBS AND GROWTH. 17 June 2010 Conclusions; Document EUCO 13/10. 2010. Available from: http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/council_conclusion_17_june_en.pdf. [accessed: 05.10.2016.]

[27] European Commission. Roadmap to a Resource Efficient Europe - COM/2011/571. 2011. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0571 [accessed: 01.10.2016.]

[28] European Council. Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. 1999. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31999L0031 [accessed: 21.03.2015.]

[29] European Parlament and Council. Directive 2008/98/EC of 19 November 2008. on waste. 2008. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098 [accessed: 21.03.2015.]

[30] European Parlament and Council. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy COM/2015/0614 final. 2015. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614 [accessed: 12.04.2018.]

[31] European Commission. Closing the loop: Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth. 2015. Available from: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm [accessed: 15.04.2018.]

[32] European Parlament. Briefing EU Legislation in Progress from July 2018 - Circular economy package Four legislative proposals on waste. 2018. Available from: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625108/EPRS_BRI(2018)625108_EN.pdf [accessed: 21.09.2018.]

[33] Directive (EU) 2018/851 of The European Parliament and of The Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. 2018. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32018L0851 [accessed: 07.09.2018.]

[34] European Parlament and Council. Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. 2018. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0100.01.ENG [accessed: 07.09.2018.]

[35] European Parlament and Council. Directive (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. 2018. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0141.01.ENG&toc=OJ:L:2018:150:TOC [accessed: 07.09.2018.]

[36] European Parlament and Council. Directive (EU) 2018/849 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directives 2000/53/EC on end-of-life vehicles, 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, and 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment. 2018. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0849&rid=4 [accessed: 07.09.2018.]

[37] European Commission. Green Paper - Towards a European strategy for the security of energy supply /* COM/2000/0769 final */. 2000. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52000DC0769 [accessed: 02.11.2017.]

[38] European Commission. State of the Energy Union 2015. Brussels, 18.11.2015. COM (2015) 572 final. 2015. Available from: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ebdf266c-8eab-11e5-983e-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF. [accessed: 14.11.2017.]

[39] Coucil of the European Union. Presidency Conclusions of the Brussels European Council (11 and 12 December 2008). Brussels: 2009. Available from: https://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_Data/docs/pressdata/en/ec/104692.pdf [accessed: 10.11.2017.]

[40] European Parlament and Council. Directive 2009/29/EC of of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community. 2009. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0029 [accessed: 02.11.2017.]

[41] European Parlament and Council. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources. 2009 Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0028 [accessed: 29.10.2017.]

[42] European Parlament and Council. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide. 2009. Available from: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:EN:PDF [accessed: 02.11.2017.]

[43] European Parlament and Council. Decision No 406/2009/EC on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. 2009. Available from: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:EN:PDF [accessed: 23.10.2017.]

[44] Coucil of the European Union. Conclusions of European Council (23 and 24 October 2014). 2014. Available from: http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/en/pdf [accessed: 25.10.2017.]

[45] European Commission. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 - COM/2011/0112 final. 2011. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52011DC0112 [accessed: 26.10.2017.]

[46] European Commission. Energy Roadmap 2050 - COM/2011/0885 final. 2011. Available from: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0885:FIN:EN:PDF [accessed: 26.10.2017.]

[47] European Commission. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system - COM/2011/0144 final. 2011. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52011DC0144 [accessed: 26.10.2017.]

[48] Connolly D, Mathiesen BV., Østergaard PA, Møller B, Nielsen S, Lund H, et al. Heat Roadmap Europe 1. Aalborg, Denmark: 2012.

[49] Connolly D, Mathiesen BV., Østergaard PA, Møller B, Nielsen S, Lund H, et al. Heat Roadmap Europe 2. Aalborg, Denmark: 2013.

[50] European Commission. Energy Efficiency. Available from: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency [accessed: 29.01.2018.]

[51] European Commission. Statement - Europe leads the global clean energy transition: Commission welcomes ambitious agreement on further renewable energy development in the EU. Available from: http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-18-4155_en.htm [accessed: 10.10.2018.]

[52] UN-Habitat. UN-Habitat - Energy 2014. Available from: https://unhabitat.org/urban-themes/energy/. [accessed: 07.11.2016.]

[53] Persson U, Munster M. Current and future prospects for heat recovery from waste in European district heating systems: A literature and data review. Energy 2016;110:116–28. doi:10.1016/j.energy.2015.12.074.

[54] Agudelo-Vera CM, Mels AR, Keesman KJ, Rijnaarts HHM. Resource management as a key factor for sustainable urban planning. J Environ Manage 2011;92:2295–303. doi:10.1016/j.jenvman.2011.05.016.

[55] European Commission. 2050 long-term strategy - The European Commission calls for a climate-neutral Europe by 2050. 2018. Available from: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en [accessed: 03.02.2019.]

[56] European Commission. Paris Agreement. 2018. Available from: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en [accessed: 03.02.2019.]

[57] George DAR, Lin BC-A, Chen Y. A circular economy model of economic growth. Environ Model Softw 2015;73:60–3. doi:10.1016/j.envsoft.2015.06.014.

[58] Ichinose D, Yamamoto M, Yoshida Y. The decoupling of affluence and waste discharge under spatial correlation: Do richer communities discharge more waste? Environ Dev Econ 2015;20:161–84. doi:10.1017/S1355770X14000370.

[59] Niero M, Negrelli AJ, Hoffmeyer SB, Olsen SI, Birkved M. Closing the loop for aluminum cans: Life Cycle Assessment of progression in Cradle-to-Cradle certification levels. J Clean Prod 2016;126:352–62. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.122.

[60] Niero M, Olsen SI. Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. Resour Conserv Recycl 2016;114:18–31. doi:10.1016/j.resconrec.2016.06.023.

[61] Huysman S, De Schaepmeester J, Ragaert K, Dewulf J, De Meester S. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. Resources, Conservation and Recycling 46 (2006) 94–103

[62] Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material: An UK energy saving perspective Anne C. Woolridge a,∗, Garth D. Ward b, Paul S. Phillips a, Michael Collins c, Simon Gandy c

[63] Persson U, Munster M. Current and future prospects for heat recovery from waste in European district heating systems: A literature and data review. Energy 2016;110:116–28. doi:10.1016/j.energy.2015.12.074.

[64] Agudelo-Vera CM, Mels AR, Keesman KJ, Rijnaarts HHM. Resource management as a key factor for sustainable urban planning. J Environ Manage 2011;92:2295–303. doi:10.1016/j.jenvman.2011.05.016.

[65] Rajaeifar MA, Ghanavati H, Dashti BB, Heijungs R, Aghbashlo M, Tabatabaei M. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:414–39. doi:10.1016/j.rser.2017.04.109.

[66] Fernández-Nava Y, del Río J, Rodríguez -Iglesias J, Castrillín L, Marañón E. Life cycle assessment of different municipal solid waste management options: a case study of Asturias (Spain). J Clean Prod 2014;81:178–89. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.008.

[67] Bovea MD, Ibáñez-Forés V, Gallardo A, Colomer-Mendoza FJ. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. Waste Manag 2010;30:2383–95. doi:10.1016/j.wasman.2010.03.001.

[68] Bueno G, Latasa I, Lozano PJ. Comparative LCA of two approaches with different emphasis on energy or material recovery for a municipal solid waste management system in Gipuzkoa. Renew Sustain Energy Rev 2015;51:449–59. doi:10.1016/j.rser.2015.06.021.

[69] Giugliano M, Cernuschi S, Grosso M, Rigamonti L. Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. Waste Manag 2011;31:2092–101. doi:10.1016/j.wasman.2011.02.029.

[70] Cherubini F, Bargigli S, Ulgiati S. Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy. Waste Manag 2008;28:2552–64.

[71] Ouda OKM, Raza SA, Nizami AS, Rehan M, Al-Waked R, Korres NE. Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. Renew Sustain Energy Rev 2016;61:328–40. doi:10.1016/j.rser.2016.04.005.

[72] Dzene I, Barisa A, Rosa M, Dobraja K. A Conceptual Methodology for Waste-to-biomethane Assessment in an Urban Environment. Energy Procedia 2016;95:3–10. doi:10.1016/j.egypro.2016.09.002.

[73] International Standardisation Organisation. ISO 14040:2006. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. Brussels: CEN (European Committee for Standardisation).

[74] International Standardisation Organisation. ISO 14044:2006. Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. Brussels: CEN (European Committee for Standardisation).

[75] Commission of the European Communities. Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking - COM(2003) 302 final. 2003. Available from: http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2003/EN/1-2003-302-EN-F1-1.Pdf [accessed: 04.03.2016.]

[76] Gentil EC, Damgaard A, Hauschild M, Finnveden G, Eriksson O, Thorneloe S, et al. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. Waste Manag 2010;30:2636–48. doi:10.1016/j.wasman.2010.06.004.

[77] De Feo G, Malvano C. The use of LCA in selecting the best MSW management system. Waste Manag 2009;29:1901–15. doi:10.1016/j.wasman.2008.12.021

[78] Tunesi S. LCA of local strategies for energy recovery from waste in England, applied to a large municipal flow. Waste Manag 2011;31:561–71. doi:10.1016/j.wasman.2010.08.023.

[79] Lima PDM, Colvero DA, Gomes AP, Wenzel H, Schalch V, Cimpan C. Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. Waste Manag 2018;78:857–70. doi:10.1016/j.wasman.2018.07.007.

[80] Rajcoomar A, Ramjeawon T. Life cycle assessment of municipal solid waste management scenarios on the small island of Mauritius. Waste Manag Res 2017;35:313–24. doi:10.1177/0734242X16679883.

[81] Mehta YD, Shastri Y, Joseph B. Economic analysis and life cycle impact assessment of municipal solid waste (MSW) disposal: A case study of Mumbai, India. Waste Manag Res 2018. doi:10.1177/0734242X18790354.

[82] Popiţa G-E, Baciu C, Rédey Á, Frunzeti N, Ionescu A, Yuzhakova T, et al. Life cycle assessment (LCA) of municipal solid waste management systems in Cluj county, Romania. Environ Eng Manag J 2017;16:47–58. doi:10.30638/eemj.2017.006

[83] Petrov RL. Original Method for Car Life Cycle Assessment (LCA) and its Aplication to LADA Cars. 2007 World Congr 2007. doi:10.4271/2007-01-1607.

[84] Zabalza Bribián I, Aranda Usón A, Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. Build Environ 2009;44:2510–20. doi:10.1016/j.buildenv.2009.05.001.

[85] Danilecki K, Mrozik M, Smurawski P. Changes in the environmental profile of a popular passenger car over the last 30 years – Results of a simplified LCA study. J Clean Prod 2017;141:208–18. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.050.

[86] Beccali M, Cellura M, Longo S, Guarino F. Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool. Sol Energy Mater Sol Cells 2016;156:92–100. doi:10.1016/j.solmat.2016.03.025.

[87] Huijbregts MAJ, Hellweg S, Frischknecht R, Hendriks HWM, Hungerbühler K, Hendriks AJ. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. Environ Sci Technol 2010;44:2189–96. doi:10.1021/es902870s.

[88] Arvidsson R, Fransson K, Fröling M, Svanström M, Molander S. Energy use indicators in energy and life cycle assessments of biofuels: Review and recommendations. J Clean Prod 2012;31:54–61. doi:10.1016/j.jclepro.2012.03.001.

[89] Scipioni A, Niero M, Mazzi A, Manzardo A, Piubello S. Significance of the use of non-renewable fossil CED as proxy indicator for screening LCA in the beverage packaging sector. Int J Life Cycle Assess 2013;18:673–82. doi:10.1007/s11367-012-0484-x.

[90] Hunt RG, Franklin WE, Welch RO, Cross JA, Woodall AE. Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives. Washington DC: 1974.

[91] Frischknecht R, Wyss F, Knöpfel SB, Lützkendorf T, Balouktsi M. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. Int J Life Cycle Assess 2015;20:957–69. doi:10.1007/s11367-015-0897-4.

[92] VDI. Cumulative energy demand—terms, definitions, methods of calculation. In: Ingenieure VD. VDI-Richtlinien 4600. 1997.

[93] SIA. 2032 Graue Energie von Gebäuden. 2010.

[94] The European Committee for Standardization (CEN). BS EN 15804: Sustainability of construction works–Environmental product declarations–Core rules for the product category of construction products. 2012.

[95] The European Committee for Standardization (CEN). CSN EN 15978. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. 2011.

[96] European Committee for Standardisation. Sustainability of construction works - Assessment of buildings. 2012.

[97] International Organization for Standardization. ISO/TR 14047:2012 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. 2012.

[98] Rohrlich M, Mistry M, Martens PN, Buntenbach S, Ruhrberg M, Dienhart M, et al. A method to calculate the Cumulative Energy Demand (CED) of lignite extraction. Int J Life Cycle Assess 2000;5:369–73. doi:10.1006/bbrc.2000.4007.

[99] Huijbregts MAJ, Rombouts LJA, Hellweg S, Frischknecht R, Hendriks AJ, Van De Meent D, et al. Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental performance of products? Environ Sci Technol 2006;40:641–8. doi:10.1021/es051689g.

[100] Dzene I, Barisa A, Rosa M, Dobraja K. A Conceptual Methodology for Waste-to-biomethane Assessment in an Urban Environment. Energy Procedia 2016;95:3–10. doi:10.1016/j.egypro.2016.09.002.

[101] Mert G, Linke BS, Aurich JC. Analysing the Cumulative Energy Demand of Product-service Systems for wind Turbines. Procedia CIRP 2017;59:214–9. doi:10.1016/j.procir.2016.09.018.

[102] Penny T, Collins M, Aumônier S, Ramchurn K, Thiele T. Embodied Energy as an Indicator for Environmental Impacts – A Case Study for Fire Sprinkler Systems, 2013, p. 555–65. doi:10.1007/978-3-642-36645-1_52.

[103] Röhrlich M, Mistry M, Martens PN, Buntenbach S, Ruhrberg M, Dienhart M, et al. A method to calculate the cumulative energy demand (CED) of lignite extraction. Int J Life Cycle Assess 2000;5:369–73. doi:10.1007/BF02978675.

[104] Oliveira LS, Pacca SA, John VM. Variability in the life cycle of concrete block CO2emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market. Constr Build Mater 2016;114:588–94. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.134.

[105] Ecoinvent Centre. Ecoinvent Database v3.2. Inf. Syst. Sustain. Dev., 2016. doi:10.4018/978-1-59140-342-5.ch003.

[106] Nabavi-Pelesaraei A, Bayat R, Hosseinzadeh-Bandbafha H, Afrasyabi H, Berrada A. Prognostication of energy use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management. J Clean Prod 2017;154:602–13. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.033.

[107] Khoshnevisan B, Rafiee S, Tabatabaei M, Ghanavati H, Mohtasebi SS, Rajaeifar MA. Response to "Prognostication of energy use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management." J Clean Prod 2017;164. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.030.

[108] Liu ZY, Li C, Fang XY, Guo YB. Cumulative energy demand and environmental impact in sustainable machining of inconel superalloy. J Clean Prod 2018;181:329–36. doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.251.

[109] Frischknecht R, Wyss F, Büsser Knöpfel S, Lützkendorf T, Balouktsi M. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. Int J Life Cycle Assess 2015;20:957–69. doi:10.1007/s11367-015-0897-4.

[110] Lamnatou C, Motte F, Notton G, Chemisana D, Cristofari C. Cumulative energy demand and global warming potential of a building-integrated solar thermal system with/without phase change material. J Environ Manage 2018;212:301–10. doi:10.1016/j.jenvman.2018.01.027.

[111] Miró L, Oró E, Boer D, Cabeza LF. Embodied energy in thermal energy storage (TES) systems for high temperature applications. Appl Energy 2015;137:793–9. doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.062.

[112] Ferroni, F., Hopkirk, R.J., 2016. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. Energy Policy 94, 336e344. http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.034.

[113] Puig R, Fullana-i-Palmer P, Baquero G, Riba J-R, Bala A. A Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making. Waste Manag 2013;33:2789–97. doi:10.1016/j.wasman.2013.08.004.

[114] Kaufman SM, Krishnan N, Themelis NJ. A Screening Life Cycle Metric to Benchmark the Environmental Sustainability of Waste Management Systems. Environ Sci Technol 2010;44:5949–55. doi:10.1021/es100505u.

[115] Zero Waste Europe. Embodied Energy: A driver for the circular economy? 2017. Available from: https://zerowasteeurope.eu/downloads/embodied-energy-a-driver-for-the-circular-economy [accessed: 07.05.2018.]

[116] Dixit MK. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:390–413.

[117] Vukotic L, Fenner R. Assessing embodied energy of building structural elements. Proc 2010:147–58. doi:10.1680/ensu.2010.163.3.147.

[118] Davies PJ, Emmitt S, Firth SK. Challenges for capturing and assessing initial embodied energy: A contractor's perspective. Constr Manag Econ 2014;32:290–308. doi:10.1080/01446193.2014.884280.

[119] Dixit MK, Culp CH, Fernandez-Solis JL. Embodied energy of construction materials: Integrating human and capital energy into an IO-based hybrid model. Environ Sci Technol 2015;49:1936–45. doi:10.1021/es503896v.

[120] Dixit MK, Singh S. Embodied energy analysis of higher education buildings using an input-output-based hybrid method. Energy Build 2018;161:41–54. doi:10.1016/j.enbuild.2017.12.022.

[121] Dixit MK. Embodied energy analysis of building materials: An improved IO-based hybrid method using sectoral disaggregation. Energy 2017;124:46–58. doi:10.1016/j.energy.2017.02.047.

[122] Dixit MK, Culp CH, Fernández-Solís JL. System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition. Renew Sustain Energy Rev 2013;21:153–64. doi:10.1016/j.rser.2012.12.037.

[123] Dixit MK, Fernández-Solís JL, Lavy S, Culp CH. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. Energy Build 2010;42:1238–47. doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.016.

[124] Penny T, Collins M, Aumônier S, Ramchurn K, Thiele T. Embodied Energy as an Indicator for Environmental Impacts – A Case Study for Fire Sprinkler Systems. In: Håkansson A, Höjer M, Howlett RJ, Jain LC, editors. Sustain. Energy Build. Smart Innov. Syst. Technol., Berlin, Heidelberg: Springer; 2013, p. 555–65. doi:10.1007/978-3-642-36645-1_52.

[125] Agostinho F, Siche R. Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as a case study. Biomass and Bioenergy 2014;71:69–83. doi:10.1016/j.biombioe.2014.10.024.

[126] Franzese PP, Rydberg T, Russo GF, Ulgiati S. Sustainable biomass production: A comparison between Gross Energy Requirement and Emergy Synthesis methods. Ecol Indic 2009;9:959–70. doi:10.1016/j.ecolind.2008.11.004.

[127] Syazwina F, Shukor A, Mohammed AH, Abdullah SI, Awang M. a Review on the Success Factors for Community Participation in Solid Waste Management 2011:963–76.

[128] Bertanza G, Ziliani E, Menoni L. Techno-economic performance indicators of municipal solid waste collection strategies. Waste Manag 2018. doi:10.1016/j.wasman.2018.01.009.

[129] Greco G, Allegrini M, Lungo CD, Savellini PG, Gabellini L. Drivers of solid waste collection costs. Empirical evidence from Italy. J Clean Prod 2014;106:364–71. doi:10.1016/j.jclepro.2014.07.011.

[130] Tan ST, Ho WS, Hashim H, Lee CT, Taib MR, Ho CS. Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. Energy Convers Manag 2015;102:111–20. doi:10.1016/j.enconman.2015.02.010.

[131] Luz FC, Rocha MH, Lora EES, Venturini OJ, Andrade RV, Leme MMV, et al. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. Energy Convers Manag 2015;103. doi:10.1016/j.enconman.2015.06.074.

[132] Fei F, Wen Z, Huang S, De Clercq D. Mechanical biological treatment of municipal solid waste: Energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis. J Clean Prod 2018;178:731–9. doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.060.

[133] Minoglou M, Komilis D. Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming-A case study in a Greek region. Resour Conserv Recycl 2013;80:46–57. doi:10.1016/j.resconrec.2013.08.004.

[134] Chifari R, Lo Piano S, Matsumoto S, Tasaki T. Does recyclable separation reduce the cost of municipal waste management in Japan? Waste Manag 2017;60:32–41. doi:10.1016/j.wasman.2017.01.015.

[135] Bel G, Fageda X. Empirical analysis of solid management waste costs: Some evidence from Galicia, Spain. Resour Conserv Recycl 2010;54:187–93. doi:10.1016/j.resconrec.2009.07.015.

[136] Aleluia J, Ferrão P. Assessing the costs of municipal solid waste treatment technologies in developing Asian countries 2017;69:592–608. doi:10.1016/j.wasman.2017.08.047.

[137] Khan M, Jain S, Vaezi M, Kumar A. Development of a decision model for the techno-economic assessment of municipal solid waste utilization pathways. Waste Manag 2016;48:548–64. doi:10.1016/j.wasman.2015.10.016.

[138] Ichinose D, Yamamoto M, Yoshida Y. The decoupling of affluence and waste discharge under spatial correlation: do richer communities discharge more waste? Environ Dev Econ 2015;20:161–84. http://dx.doi.org/10.1017/ S1355770X14000370.

[139] Mazzanti M, Montini a, Zoboli R. Municipal waste generation and socioeconomic drivers: evidence from comparing northern and southern Italy. J Environ Dev 2008;17:51–69. doi:10.1177/1070496507312575.

[140] Mazzanti M, Zoboli R. Waste generation, waste disposal and policy effectiveness. Resour Conserv Recycl 2008;52:1221–34. doi:10.1016/ j.resconrec.2008.07.003.

[141] Christensen TH, Simion F, Tonini D, Møller J. Global warming factors modelled for 40 generic municipal waste management scenarios. Waste Manag Res 2009;27:871–84. doi:10.1177/0734242X09350333.

[142] Taşeli BK. The impact of the European Landfill Directive on waste management strategy and current legislation in Turkey's Specially Protected Areas. Resour Conserv Recycl 2007;52:119–35. doi:10.1016/j.resconrec.2007.03.003.

[143] Cho HS, Moon HS, Kim JY. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. Bioresour Technol 2012;109:86–92. doi:10.1016/j.biortech.2012.01.026.

[144] Wolf C, Klein D, Richter K, Weber-Blaschke G. Environmental effects of shifts in a regional heating mix through variations in the utilization of solid biofuels. J Environ Manage 2016;177:177–91. doi:10.1016/j.jenvman.2016.04.019.

[145] Baran B, Mamis MS, Alagoz BB. Utilization of energy from waste potential in Turkey as distributed secondary renewable energy source. Renew Energy 2016;90:493–500. doi:10.1016/j.renene.2015.12.070.

[146] Zakir Hossain HM, Hasna Hossain Q, Uddin Monir MM, Ahmed MT. Municipal solid waste (MSW) as a source of renewable energy in Bangladesh: Revisited. Renew Sustain Energy Rev 2014;39:35–41. doi:10.1016/j.rser.2014.07.007.

[147] Al-Hamamre Z, Saidan M, Hararah M, Rawajfeh K, Alkhasawneh HE, Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for

Jordan. Renew Sustain Energy Rev 2017;67:295–314. doi:10.1016/j.rser.2016.09.035.

[148] Hamad TA, Agll AA, Hamad YM, Sheffield JW. Solid waste as renewable source of energy: Current and future possibility in Libya. Case Stud Therm Eng 2014;4:144–52. doi:10.1016/j.csite.2014.09.004.

[149] Minoglou M, Komilis D. Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming-A case study in a Greek region. Resour Conserv Recycl 2013;80:46–57. doi:10.1016/j.resconrec.2013.08.004.

[150] Radovanovic PM, Jovanovic MP, Eric AM. Opportunities of solid renewable fuels for (co-)combustion with coal in power plants in Serbia. Therm Sci 2014;18:631–44. doi:10.2298/TSCI121210122R.

[151] Kirkerud JG, Trømborg E, Bolkesjø TF. Impacts of electricity grid tariffs on flexible use of electricity to heat generation. Energy 2016;115:1679–87. doi:10.1016/j.energy.2016.06.147.

[152] Perković L, Mikulčić H, Pavlinek L, Wang X, Vujanović M, Tan H, et al. Coupling of cleaner production with a day-ahead electricity market: A hypothetical case study. J Clean Prod 2017;143:1011–20. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.019.

[153] Perković L, Mikulčić H, Duić N. Multi-objective optimization of a simplified factory model acting as a prosumer on the electricity market. J Clean Prod 2018;167:1438–49. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.078.

[154] Magnusson D. Who brings the heat???? from municipal to diversified ownership in the Swedish district heating market post-liberalization. Energy Res Soc Sci 2016;22:198–209. doi:10.1016/j.erss.2016.10.004.

[155] Syri S, Mäkelä H, Rinne S, Wirgentius N. Open district heating for Espoo city with marginal cost based pricing. Int Conf Eur Energy Mark EEM 2015;2015–August. doi:10.1109/EEM.2015.7216654.

[156] Thomé AMT, Ceryno PS, Scavarda A, Remmen A. Sustainable infrastructure: A review and a research agenda. J Environ Manage 2016;184:143–56. doi:10.1016/j.jenvman.2016.09.080.

[157] Tomić T, Schneider DR. The role of energy from waste in circular economy and closing the loop concept – Energy analysis approach. Renew Sustain Energy Rev 2018;98:268–87. doi:10.1016/j.rser.2018.09.029.

[158] Tomić T, Dominković DF, Pfeifer A, Schneider DR, Pedersen AS, Duić N. Waste to energy plant operation under the influence of market and legislation conditioned changes. Energy 2017;137:1119–29. doi:10.1016/j.energy.2017.04.080.

[159] Tomić T, Schneider DR. Municipal solid waste system analysis through energy consumption and return approach. J Environ Manage 2017;203:973–87. doi:10.1016/j.jenvman.2017.06.070.

[160] Tomić T, Ćosić B, Schneider DR. Influence of legislative conditioned changes in waste management on economic viability of MSW-fuelled district heating system: Case study. Therm Sci 2016;20:1105–20. doi:10.2298/TSCI160212114T.

[161] Tomić T, Schneider DR. Impact of Changes in the Waste Management System Structure on the Cost of the System. In: Ban M, editor. 3rd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SEE SDEWES Novi Sad 2018; Novi Sad, Srbija, 30.06.-04.07.2018. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

[162] Tomić T, Schneider DR. Energy Analysis of Waste and Energy System Integration. In: Ban M, editor. 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Dubrovnik 2017; Dubrovnik, Hrvatska, 4.-8.10.2017. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.

[163] Tomić T, Schneider DR. The Role of Energy from Waste in Closing the Loop Concept. In: Ban M, editor. 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Dubrovnik 2017; Dubrovnik, Hrvatska, 4.-8.10.2017. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.

[164] Tomić T, Dominković DF, Pfeifer A, Schneider DR. WtE power plant operation on the energy market under the influence of legislation changes. In: Ban M, editor. 2nd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SEE SDEWES Piran 2016; Piran, Slovenija, 15.-18.06.2016.. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[165] Tomić T, Schneider DR. Sustainability analysis of MSW management system through energy consumption and return approach. In: Ban M, editor. 2nd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SEE SDEWES Piran 2016; Piran, Slovenija, 15.-18.06.2016.. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[166] Tomić T, Ćosić B, Schneider DR. Economic viability of biomass and MSW-fuelled district heating system: case of the city of Zagreb. In: Ban M, editor. 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Dubrovnik 2015; Dubrovnik, Hrvatska, 27.09.-2.10.2015. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.

[167] Schneider DR, Tomić T. The Interdependence of Material and Energy Recovery of Municipal Solid Waste. In: Ban M, editor. 1st Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – LA SDEWES Rio de Janeiro 2018; Rio de Janeiro, Brasil, 28.-31.01.2018. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

[168] Tomić T, Schneider DR. Circular Economy from the Energy Point of View. In: Sustainable Process Integration Laboratory Scientific Conference: Energy, Water, Emission & Waste in Industry and Cities; Brno, Češka, 06-07.12.2017. Brno: Sustainable Process Integration Laboratory; 2017.

[169] NREL. USLCI database. 2016. Available from:http://www.nrel.gov/lci/ [accessed: 03.010.2016.]

[170] McDougall FR, Franke M, Hindle P, White PR. Integrated solid waste management: a life cycle inventory. Blackwell Science. 2001.

[171] Weidema BP, Bauer C, Hischier R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo CO, Wernet G. 2013. Overview and Methodology. Data Quality Guideline for the Ecoinvent Database Version 3. Ecoinvent Report 1(v3). The ecoinvent Centre. St. Gallen. 2013. Available from: https://lca-net.com/publications/show/overview-methodology-data-quality-guideline-ecoinvent-database-version-3/ [accessed: 13.08.2016.]

[172] Athena Sustainable Materials Institute. U.S. LCI Database Project Development Guidelines. 2004. Available from: https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34275.pdf [accessed: 28.06.2016.]

[173] Suh S, Leighton M, Tomar S, Chen C. Interoperability between ecoinvent ver. 3 and US LCI database: a case study. Int. J. Life Cycle Assess 2016;21:1290-1298. doi:10.1007/s11367-013-0592-2.

[174] National Renewable Energy Laboratory. U.S. LCI Database Project - User's Guide. 2004. Available from: https://www.nrel.gov/lci/assets/pdfs/users_guide.pdf [accessed: 29.07.2016.]

[175] Boer ED, Boer JD, Jager J. Waste Management Planning and Optimisation (LCA IWM). Obidem-Verlag. Stutgart. 2005.

[176] Croasdell S, Watson S, How E. 2015. Review of 2012 Metal Packaging Statistics. Available from: http://metalpackagingeurope.org/wp [accessed: 01.11.2016.]

[177] International Solid Waste Association, Thermal treatment plants. Available from: www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_ download&documentUid=3119 [accessed: 17.12.2015.]

[178] Energinet.dk. Technology data for energy plants. 2012. Available from: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/4/42/Energinet.dk._Technology_Data_for_Energy_Plants._2012.pdf [accessed: 08.02.2017.]

[179] United States Environmental Protection Agency - USEPA AP-42 chapter 2.4 Municipal solid waste landfills Available from: https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/final/c02s04.pdf [accessed: 17.01.2017.]

[180] Dunnebeil F, Lambrecht U. Fuel efficiency and emissions of trucks in Germany – an overview. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. 2012.

[181] Karavezyris V. Prognose von Siedlungsabfällen: Untersuchungen zu determinierenden Faktoren und methodischen Ansätzen. TK Verlag, Neuruppin. 2001.

[182] Armstrong, JS. Principles of forecasting: a handbook for researchers and Practitioners. Kluwer Academic Publishers. Boston. 2001

[183] Sircar R, Ewert F, and Bohn U. Ganzheitliche Prognose von Siedlungsabfällen. Müll und Abfall 2003;1:7-11.

[184] Dennison GJ, Dodd VA, Whelan B. A socio-economic based survey of household waste characteristics in the city of Dublin, Ireland, II. Waste quantities. Resources, Conservation and Recycling 1996;17:245-257.

[185] Bach H, Mild A, Natter M, Weber A. Combining sociodemographic and logistic factors to explain the generation and collection of waste paper. Resources, Conservation and Recycling 2004;41(1):65-73.

[186] Sharma BK. Analytical Chemistry: (Comprehensively Covering the UGC Syllabus). Krishna Prakashan Media. Meerut, Delhi. 2006.

[187] Magrinho A, Semiao V. Estimation of Residual MSW Heating Value as a Function of Waste Compo-nent Recycling. Waste Management 2008;28(12):2675-2683.

[188] Weidema B. Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment. J Ind Ecol 2001;11:4–33.

[189] Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus H-J, Bauer C, Doka G, Dones R, et al. Implementation of life cycle impact assessment methods. Ecoinvent report No. 3, v2.0. 2007. Available from: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:41028089 [accessed: 10.10.2016.]

[190] Ripa, M., Fiorentino, G., Vacca, V., Ulgiati, S., 2017. The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). J. Clean. Prod. 142, 445e460. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.149.

[191] Ekvall, T., Assefa, G., Bj€orklund, A., Eriksson, O., Finnveden, G., 2007. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. Waste Manag. 27, 989e996. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.015.

[192] ISWA, 2015. Circular Economy: Carbon, Nutrients and Soil. Vienna, Austria. Available from: https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/Task_Force_Report_4.pdf [accessed: 18.11.2016.]

[193] Gilbert, J.C., 2009. Comparison and Analysis of Energy Consumption in Typical Iowa Swine Finishing Systems. M.Sc. Thesis. Iowa State University. Available from: https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&htt psredir=1&article=2019&context=etd [accessed: 18.11.2016.]

[194] Franckx L, VanAcoleyen M, Hogg D, Gibbs A, Elliott T, Sherrington C, et al. Assessment of the options to improve the emangement of biowaste in the european union. 2010. Available from: http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/pdf/ia_biowaste%20-%20final%20report.pdf [accessed: 20.12.2016.]

[195] Karellas S, Boukis I, Kontopoulos G. Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. Renew Sustain Energy Rev 2010;14:1273–82. doi:10.1016/j.rser.2009.12.002.

[196] Katie Elizabeth HW. A techno-economic comparison of biogas upgrading technologies in Europe. Jyväskylä. University of Jyväskylä. 2012. Available from:

http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.1353&rep=rep1&type=pdf [accessed: 05.12.2017.]

[197] Mitchell G. Building a Business Case for Compressed Natural Gas in Fleet Applications. National Renewable Energy Laboratory. 2015. Available from: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/business_case_cng_fleets.pdf [accessed: 04.12.2017.]

[198] Wood, S., et al., Review of State-of-the-art Waste-to-energy Technologies, Stage Two Report – Case studies, WSP, London, UK, 2013 Available from: http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/WSP%20Waste%20to%20Energy%20Technical%20Report%20Stage%20Two.pdf [accessed: 12.07.2015.]

[199] A2A Group. Brescia plant data. Available from: www.a2a.eu/gruppo/export/sites/default/a2a/en/plants_networks/ waste_to_energy/ documenti/folder_brescia.pdf [accessed: 12.07.2015.]

[200] Friotherm AG. Available from: www.friotherm.com/webautor-data/41/sysave006_uk.pdf [accessed: 12.07.2015.]

[201] Epem SA. Database of Waste Management Technologies. Available from: www.epem.gr/waste-c-control/ database/html/costdata-00.htm#Incineration [accessed: 11.07.2015.]

[202] Granatstein DI. Technoeconomic Assessment of Fluidized Bed Combustors as Municipal Solid Waste Incinerators: A Summary of Six Case Studies, IEA Task 23, CETC. Nepean, Canada. 2000. Available from: https://www.scribd.com/document/227844300/A-Summary-of-Six-Case-Studies [accessed: 07.07.2015.]

[203] UK Government. Projects in procurement. 2013. Available from: www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/ file/230869 /Annex_B_-_pfi_projects_in_procurement_march_2013.xlsx [accessed: 07.07.2015.]

[204] UK Government. Incineration of municipal waste. Available from: www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/ file/221036 /pb13889-incineration-municipal-waste.pdf [accessed: 04.07.2015.]

[205] ARUP. Bradford and Calderdale Residual Waste Management Project. Available from: www.arup.com/Projects/

Bradford_and_Calderdale_Residual_Waste_Management_Project.aspx [accessed: 10.07.2015.]

[206] Green Investment Bank. Investment in new waste to energy project. Available from: www.greeninvestmentbank.com/news-and-insight/2013/green-investment -bank-announces-investment-in-new-waste-to-energy-project/ [accessed: 12.07.2015.]

[207] Waste Management World. 320,000 TPA Recycling, Biogas and Waste to Energy Plant Secures Finance in Yorkshire. Available from: www.waste-management-world.com/articles/2014/11/320-000-tpa-recycling-biogas-and-waste-to-energy-plant-secures-finance-in-yorkshire.html [accessed: 12.07.2015.]

[208] Kalogirou E. MVB (MSW & Biomass) Waste to Energy Plants and the AVG Hazardous WTE Plant in Hamburg, Germany. WtERT Technical Report. Columbia University, New York. 2010 Available from: http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/HAMBURG_VISIT_of_Dr__KALOGIROU.pdf [accessed: 16.07.2015.]

[209] Kalogirou E. Oslo Norway WtE Plant, WtERT Technical Report, Earth Engineering Center, Columbia University, New York. 2011 Available from: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Kalogirou_report_OSLO_WtE.pdf [accessed: 16.07.2015.]

[210] State of Green. Waste-to-Energy CHP, EGE in Oslo Norway. Available from: https://stateofgreen.com/en/profiles/ramboll/solutions/waste-to-energy-chp-ege-in-oslo-norway [accessed: 22.07.2015.]

[211] Vantann Energia. Waste-to-energy gives a new life for rubbish. Available from: www.vantaanenergia.fi/en/waste-to-energy-gives-a-new-life-for-rubbish/ [accessed: 22.07.2015.]

[212] eew. Thermal waste treatment and energy generation plant (TREA) Breisgau. Available from: www.eew-energyfromwaste.com/en/our-sites/breisgau.html [accessed: 27.06.2015.]

[213] eew. Knapsack Standort. Available from: www.eew-energyfromwaste.com/fileadmin/content/Materialbestellung/Knapsack _Standortflyer.pdf [accessed: 27.06.2015.]

[214] Kalogirou E. Report of Participation at Meeting of MatER, Synergia, Torino, Italy. 2013. Available from:

http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/newwtert/Research/sofos/Report%20of%20GWC%20participation%20at%20Torino.pdf [accessed: 15.06.2015.]

[215] SACE. Available from: www.eib.org/epec/resources/presentations/sace-guarantees-psf-may2011.pdf [accessed: 15.06.2015.]

[216] HZ INOVA. Lausanne / Switzerland Energy-from-Waste Plant. Available from: www.hz-inova.com/cms/wp-content/uploads/2014/11/hzi_ref_lausanne-en.pdf [accessed: 16.06.2015.]

[217] EPEM. Database of Waste Management Technologies. Available from: www.epem.gr/waste-c-control/database/html/costdata-00.htm [accessed: 20.06.2015.]

[218] Eunomia Research & Consulting. EU waste management. Available from: http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/ euwasteman-agement_annexes.pdf [accessed: 12.07.2015.]

[219] Lončar, D., et al., Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu. Završno izvješće. Centar za transfer tehnologije – CTT. Zagreb. 2009. Available from: http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/BIOCHP_HR.pdf [accessed: 23.7.2015.]

[220] European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. Available from: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf [accessed: 23.7.2015.]

[221] Letsrecycle. Secondary material market prices indicators. Available from: https://www.letsrecycle.com/ [accessed: 13.03.2018.]

[222] Köksalan MM, Wallenius J, Zionts S. The Early History of MCDM. Multiple Criteria Decision Making: From Early History to the 21st Century. 2011:210. ISBN: 9789814335591

[223] Dodgson J, Spackman M, Pearman A, Phillips L. DETR. Multicriteria Analysis - A manual. 2000. Available from: http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf [accessed: 24.9.2018.]

[224] Diaby V, Campbell K, Goeree R. Multi-criteria decision analysis (MCDA) in health care: A bibliometric analysis. Oper Res Heal Care 2013;2:20–4. doi:10.1016/j.orhc.2013.03.001.

[225] Gregory R, Failing L, Harstone M, Long G, McDaniels T, Ohlson D. Structured Decision Making: A Practical Guide to Environmental Management Choices. Struct Decis Mak A Pract Guid to Environ Manag Choices 2012. doi:10.1002/9781444398557.

[226] Thokala P, Devlin N, Marsh K, Baltussen R, Boysen M, Kalo Z, et al. Multiple criteria decision analysis for health care decision making – An Introduction : Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. Value Health 2014;19:1–13.

[227] Hayashi K. Multicriteria analysis for agricultural resource management: A critical survey and future perspectives. Eur J Oper Res 2000;122:486–500. doi:10.1016/S0377-2217(99)00249-0.

[228] Kumar A, Kumar P, Sah B, Bam G. A Hybrid Micro Grid for Remote Village in Himalayas. 3rd Renew Power Gener Conf (RPG 2014) 2014:8.43-8.43. doi:10.1049/cp.2014.0928.

[229] Kumar A, Sah B, Deng Y, He X, Bansal RC, Kumar P. Autonomous hybrid renewable energy system optimization for minimum cost. IET Conf Publ 2015;2015. doi:http://dx.doi.org/10.1049/cp.2015.0332.

[230] Schäfer A, Moser A. Dispatch optimization and economic evaluation of distributed generation in a virtual power plant. 2012 IEEE Energytech, Energytech 2012 2012. doi:10.1109/EnergyTech.2012.6304655.

[231] Tsoutsos T, Drandaki M, Frantzeskaki N, Iosifidis E, Kiosses I. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. Energy Policy 2009;37:1587–600. doi:10.1016/j.enpol.2008.12.011.

[232] Kumar A, Sah B, Singh AR, Deng Y, He X, Kumar P, et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. Renew Sustain Energy Rev 2017;69:596–609. doi:10.1016/j.rser.2016.11.191.

[233] Gwo-Hshiung Tzeng, Jih-Jeng Huang. Multiple attribute decision making - methods and applications. CRC Press; 2011. ISBN: 978-1-4398-6158-5.

[234] Tomić V, Marinković Z, Janošević D. PROMETHEE method implementation with multi-criteria decisions. Mech Eng 2011;9:193–202. doi:10.1016/0092-8674(88)90109-2.

[235] Radoijčić M, Žižović M. Primjena Metoda Višekriterijumske Analize u Poslovnom Odlučivanju. Tehnički Fakultet u Čačku. 1998.

[236] Brans J-P, Smet Y De. Promethee Methodes. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, New York: Springer; n.d. doi:10.1007/978-1-4939-3094-4.

[237] Mladineo N. Podrška izvođenju i odlučivanju u graditeljstvu. Građevinskoarhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu. 2009.

[238] VPSolutions. Visual PROMETHEE 1.4 Manual. 2013. Available from: www.promethee-gaia.net [accessed: 24.09.2018.]

[239] European Commission. Capital factsheet on separate collection - under the project „Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU“. Brussels; 2015. Available from: https://www.municipalwasteeurope.eu/sites/default/files/BG%20Sofia%20Capital%20factsheet.pdf [accessed: 13.01.2018.]

[240] European Commission. Assessment of separate collection schemes in the 28 capitalsof the EU – Final report. Brussels; 2015. Available from: http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/Separate%20collection_Final%20Report.pdf [accessed: 13.01.2018.]

[241] AZO – Agencije za zaštitu okoliša. Izvješće o komunalnom otpadu; 2014. Available from: www.azo.hr/lgs.axd?T=16&id=5082. [accessed: 24.11.2015.]

[242] Mužinić M, Pašalić G, Martina C, Fundurulja D, Domanovac T. Plan gospodarenja otpadom Grada Zagreba. Grad Zagreb, 2007.

[243] Al Seadi T, Rutz D, Prassl H. Priručnik za bioplin. Biogas for Eastern Europe Project; 2008. Available from: https://www.big-east.eu/croatia/handbook/Prirucnik_za_bioplin_w%5B1%5D.pdf

[244] Dobrović S, Juretić H, Smoljanić G. Ekološki zasnovan sustav gospodarenja komunalnim otpadom na grada Rijeke s okolicom. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014. Available from: http://www.mariscina.com/wp-content/uploads/2013/04/Studija-EZSGO-20130402.pdf [accessed: 20.01.2019.]

[245] Lopez JM, Flores N, Jimenez F, Aparicio F. Emissions pollutant from diesel, biodiesel and natural gas refuse collection vehicles in urban areas. Proc 9th Highw Urban Environ Symp 2009:141–8. doi:10.1007/978-90-481-3043-6_16.

[246] Vlada Republike Hrvatske. Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije. 2013. Available from: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_11_133_2888.html [accessed: 27.10.2015.]

[247] HEP Toplinarstvo – cjenik toplinske energije. 2016. Available from: http://www.hep.hr/toplinarstvo/en/customers/price.aspx. [accessed: 29.03.2016.]

[248] Ministry of Housing and Urban Affairs, Goverrnment of India. Guidelines on Usage of Refuse Derived Fuel in Various Industries. Available from: http://164.100.228.143:8080/sbm/content/writereaddata/Guidelines%20on%20RDF%20Usage.pdf [accessed: 08.10.2018.]

[249] RPS. Dublin Waste to Energy – Waste Market Assessment. Available from: https://www.indymedia.ie/attachments/oct2014/rpsreportfinal.pdf [accessed: 06.10.2018.]

[250] EcoMondis. Waste Derived Alternative Fuels. Available from: http://ecomondis.com/brochure.pdf [accessed: 06.10.2018.]

9. PRILOG

Tablica 51. Ulazni tokovi otpada za tehnologije sortiranja

Tehnologija sortiranja	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
Staklo [t]	8,353	10,450	13,890
Papir [t]	1,447	59,700	82,200
Metal [t]	2,803	3,140	3,570
Plastika [t]	57,002	73,078	98,862
Miješani [t]	232,587	108,300	123,600

Tablica 52. Ulazni tokovi otpada za tehnologije materijalne oporabe

Tehnologija proizvodnje	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
Staklo [t]	7,735	9,676	12,861
Papir [t]	1,459	59,045	81,296
Aluminij [t]	336	382	444
Čelik [t]	2,507	2,851	3,252
PET [t]	31,949	42,242	57,145
HDPE [t]	9555	12,250	16,572
Kompost [t]	0	0	0

Tablica 53. Ulazni tokovi otpada za tehnologije energetske oporabe i odlaganja

Tehnologija	Ulaz (t)	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
AD	Bio	97,856	121,284	151,660
Cementara	GIO	99,276	71,326	94,229
Odlagalište	Ostatni	23,259	10,830	12,360

Tablica 54. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba a AD - Danas

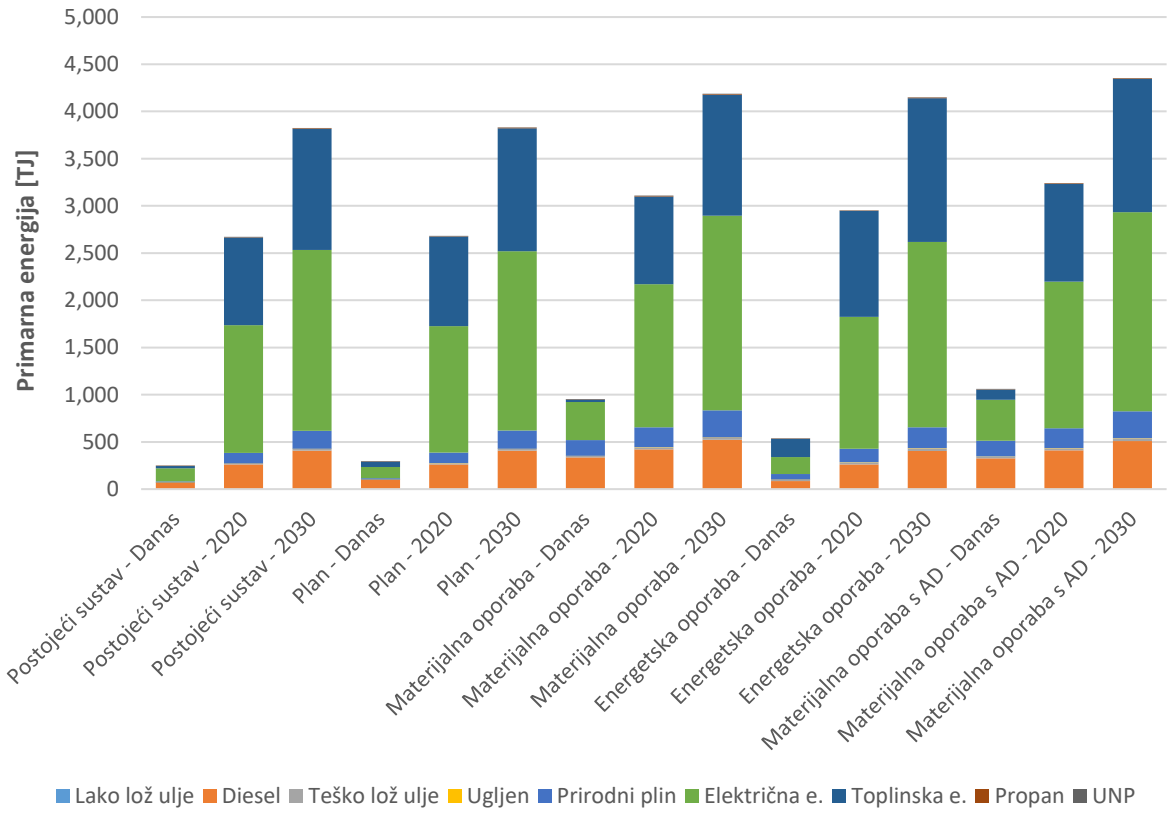
Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako lož ulje (kg)	0	0	381	0	0
Dizel (kg)	978.267	689.266	3.874.993	22.671	0
Teško lož ulje (kg)	0	0	0	292.058	0
Ugljen (kg)	0	0	0	31.765,66	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	3.074.008	0
Električna e. (kWh)	0	0	11.294.954	22.176.754	3.413.351
Toplinska e. (MJ)	0	0	1.520.821	20.614.753	71.997.151
Propan (MJ)	0	0	0	107.420	0
UNP (kg)	0	0	0	9.167	0

Tablica 55. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba s AD - 2020

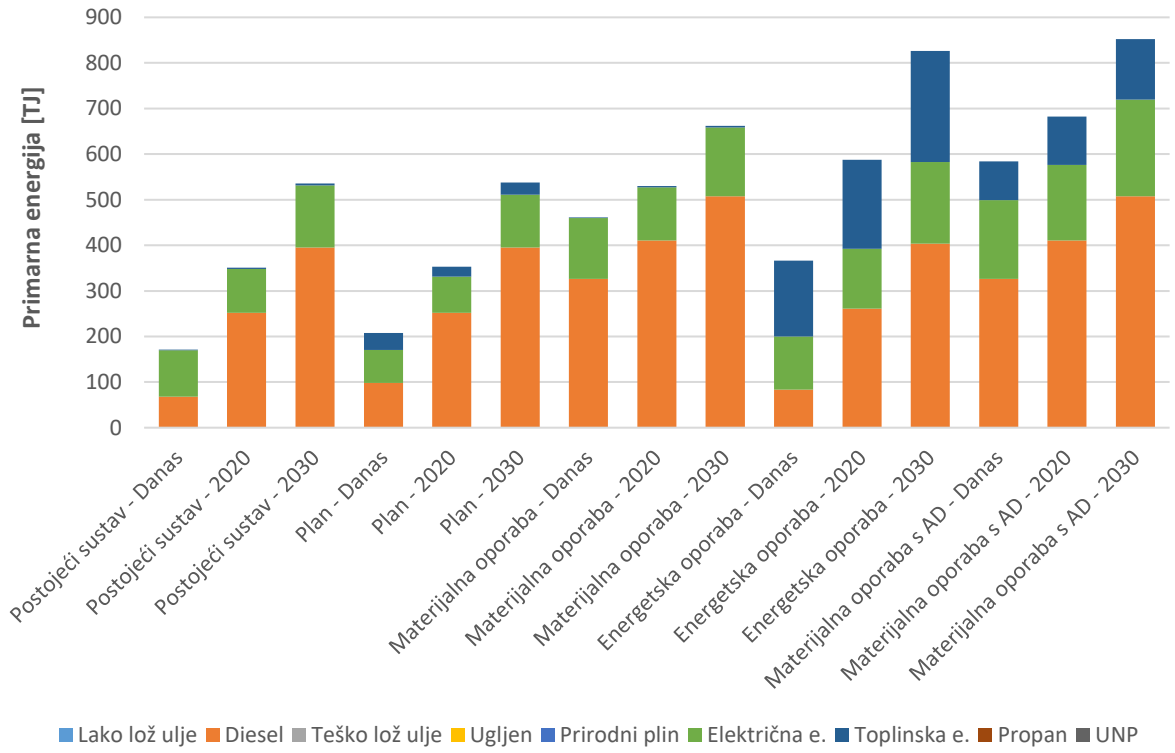
Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako lož ulje (kg)	0	0	427,04	0,00	0
Dizel (kg)	1.166.620	878.675	4.927.346	28.562	0
Teško lož ulje (kg)	0	0	0	365.363	0
Ugljen (kg)	0	0	0	36.126	0
Prirodni plin (m3)	0	0	0	3.904.111	0
Električna e. (kWh)	0	0	10.230.440	123.644.054	4.095.614
Toplinska e. (MJ)	0	0	2.529.387	796.882.417	89.172.105
Propan (MJ)	0	0	0	4.347.029,75	0
UNP (kg)	0	0	0	11.752,65	0

Tablica 56. Neposredna potrošnja energenata, scenarij Materijalna oporaba s AD - 2030

Energetski vektor	Skupljanje	Transport	Sortiranje	Materijalna oporaba	Energetska oporaba i odlaganje
Lako lož ulje (kg)	0	0	486	0,00	0,00
Dizel (kg)	1.518.244	878.675	6.605.214	38.159,44	0,00
Teško lož ulje (kg)	0	0	0,00	485.635,56	0,00
Ugljen (kg)	0	0	0,00	41.206,38	0,00
Prirodni plin (m3)	0	0	0,00	5.240.578,43	0,00
Električna e. (kWh)	0	0	13.239.156	169.337.068	5.081.061
Toplinska e. (MJ)	0	0	3.079.385	1.096.937.837	111.501.919
Propan (MJ)	0	0	0,00	5.985.229,11	0,00
UNP (kg)	0	0	0,00	15.899,26	0,00



Slika 91. Ukupna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima



Slika 92. Potrošnja primarne energije sukladno razmatranim scenarijima i vremenskim razdobljima po energentima na lokalnoj razini

Tablica 57. Dodatna neposredna potrošnja energenata sukladno razmatranim varijantama

Varijanta	Energent	Materijalna oporaba s AD - Danas	Materijalna oporaba s AD - 2020	Materijalna oporaba s AD - 2030
Biometan u mrežu	El. energ (kWh)	5.419.233	6.887.945	8.692.335
Biometan u SPP	El. energ (kWh)	5.486.933	6.973.992	8.800.924

Tablica 58. Dodatna potrošnja primarne energije sukladno razmatranim varijantama

Varijanta	Materijalna oporaba s AD - Danas [MJ]	Materijalna oporaba s AD - 2020 [MJ]	Materijalna oporaba s AD - 2030[MJ]
Biometan u mrežu	59.778.499	75.979.565	95.883.437
Biometan u SPP	60.525.281	76.928.739	97.081.260

Tablica 59. Proizvodnja sekundarnih materijala po scenarijima

	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
Staklo [t]	12,375	15,481	20,578
Papir [t]	1,978	80,025	110,183
Aluminij [t]	333	379	440
Čelik [t]	2,269	2,580	2,943
PET [t]	27,007	34,624	46,840
HDPE [t]	8,469	10,858	14,689

Tablica 60. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – neposredna proizvodnja

Teh.	Produkt	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
AD	Bioplin (‘000 m3)	16,258	20,664	26,077

Tablica 61. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Upotreba bioplina u kogeneracijskoj proizvodnji

Ulaz	Produkt	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
Bioplin iz AD	El. energ (MWh)	32,645	41,908	53,078
	Toplina (GJ)	202,020	259,306	328,418
Ukupna proizv.*	El. energ (MWh)	32,645	41,908	53,078
	Toplina (GJ)	202,020	259,306	328,418

* Uključujući prethodne faze i proizvodnju ostalih tehnologija

Tablica 62. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u mrežu

Ulaz	Produkt	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
Bioplin iz AD	Metan (5 bar) (‘000 m3)	10,838	13,776	17,385
Ukupna proizv.*	El. energ (MWh)	0	0	0
	Toplina (GJ)	0	0	0
	Metan (5 bar) (‘000 m3)	10,838	13,776	17,385

* Uključujući prethodne faze i proizvodnju ostalih tehnologija

Tablica 63. Energetska proizvodnja po tehnologiji i energetskom proizvodu – varijanta: Biometan u SPP

Ulaz	Produkt	Mat. oporaba s AD - Danas	Mat. oporaba s AD - 2020	Mat. oporaba s AD - 2030
Metan (5 bar) iz AD	Metan (200 bar) (kg)	325,421	413,615	521,968
Ukupna proizv.*	El. energ (MWh)	0	0	0
	Toplina (GJ)	0	0	0
	Metan (200 bar) (kg)	325,421	413,615	521,968

* Uključujući prethodne faze i proizvodnju ostalih tehnologija

10. ŽIVOTOPIS

Tihomir Tomić (broj znanstvenika: 359003), rođen je 06.07.1987. u Zagrebu, Hrvatska. Zvanje Tehničara za računalstvo stekao je 2006. godine kada i upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu koji završava 2014. godine s najvećim počastima (SUMMA CUM LAUDE Magister). Od 2014. godine je na postdiplomskom doktorskom studiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu s temom doktorata "Energetska oporaba otpada pod utjecajem europske legislative".

Od 2009.-2010. je radio kao Asistent za uspostavu registra i tehničku podršku za UNDP - United Nations Development Programme (UNDP), od 2013.-2014. kao Stručni suradnik na projektu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. 2014. je od srpnja do kolovoza bio praktikant u JANAF - Jadranskom naftovodu d.d. da bi se početkom 2015. zaposlio kao Stručni suradnik u sustavu znanosti i visokog obrazovanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te od početka 2017. radi kao Asistent u sustavu znanosti i visokog obrazovanja na istoj ustanovi. Član je Međunarodnog centra za održivi razvoj energetike, voda i okoliša (SDEWES Centre) od 2015. godine. Također, od 2015. član je organizacijskih odbora (LOC) konferencija SDEWES i SEE SDEWES.

Njegovo područje stručnosti uključuje sustave gospodarenja otpadom i njegove oporabe, energetsku oporabu otpada i otpadnih materijala, integraciju sustava gospodarenja otpadom i energetskih sustava, obnovljive izvore energije, energetsko planiranje te centralizirane toplinske sustave.

Radio je na 5 projekata: UN projekt "Removal of barriers for energy efficiency in Croatia", FP7 projekt "Delivery of sustainable supply of non-food biomass to support a "resource-efficient" bioeconomy in Europe (S2Biom)", IPA projekt "Diffusion of Cooling and Refreshing Technologies using the Solar Energy Resource in the Adriatic Regions (ADRIACOLD)", IEE projekt "Multi-level actions for enhanced Heating and Cooling plans (STRATEGO)" te HRZZ projektu „Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti“ na kojemu trenutno radi. U navedenom HRZZ projektu provode se ispitivanja s ciljem istraživanja mogućnosti integracije otpada i otpadnih materijala (uključujući i goriva iz otpada RDF/SRF kao i biorazgradivog otpada), kao lokalnog energetskog izvora, u napredne sustave proizvodnje i distribucije toplinske i električne energije.

Do sada ima objavljena četiri znanstvena rada u časopisima s međunarodnom recenzijom, od čega su tri u časopisima indeksiranim u Current Contents bazi, sedam radova u zbornicima s konferencija s međunarodnom recenzijom te dva elaborata. Također, sudjelovao je na šest ostalih znanstvenih skupova (bez objave ili su objavljeni samo sažeci radova). Recenzent je za časopis Journal of Environmental Management.

Znanstveni radovi:

[1] Tomić T, Schneider DR. The role of energy from waste in circular economy and closing the loop concept – Energy analysis approach. Renewable & sustainable energy reviews 2018;98:268–87. CC, SCI, SCIE, Q1, IF 9.184, Citiranost = 1 (SCOPUS, prosinac 2018.)

[2] Tomić T, Dominković DF, Pfeifer A, Schneider DR, Pedersen AS, Duić N. Waste to energy plant operation under the influence of market and legislation conditioned changes. Energy 2017;137:1119–29. CC, SCI, SCIE, Q1, IF 4.968, Citiranost = 10 (SCOPUS, prosinac 2018.)

[3] Tomić T, Schneider DR. Municipal solid waste system analysis through energy consumption and return approach. Journal of Environmental Management 2017;203:973–87. CC, SCI, SCIE, Q1, IF 4.005, Citiranost = 7 (SCOPUS, prosinac 2018.)

[4] Tomić T, Ćosić B, Schneider DR. Influence of legislative conditioned changes in waste management on economic viability of MSW-fuelled district heating system: Case study. Thermal Science 2016;20:1105–20. SCIE, Q3, IF 1.093, Citiranost = 7 (SCOPUS, prosinac 2018.)

[5] Pfeifer A, Dobravec V, Tomić T, Egieya J, Čuček L, Krajačić G, Kravanja Z, Duić N. Integration of waste management and renewable energy sources on Smart Islands. In: 1st International Conference on Technologies & Business Models for Circular Economy – TBMCE 2018; Portorož, Slovenia, 5.-7.9.2018. Portorož : Technologies & Business Models for Circular Economy, 2018.

[6] Tomić T, Schneider DR. Impact of Changes in the Waste Management System Structure on the Cost of the System. In: Ban M, editor. 3rd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SEE SDEWES

Novi Sad 2018; Novi Sad, Srbija, 30.06.-04.07.2018. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

[7] Schneider DR, Tomić T. The Interdependence of Material and Energy Recovery of Municipal Solid Waste. In: Ban M, editor. 1st Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – LA SDEWES Rio de Janeiro 2018; Rio de Janeiro, Brasil, 28.-31.01.2018. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

[8] Tomić T, Schneider DR. Circular Economy from the Energy Point of View. In: Sustainable Process Integration Laboratory Scientific Conference: Energy, Water, Emission & Waste in Industry and Cities; Brno, Češka, 06-07.12.2017. Brno: Sustainable Process Integration Laboratory; 2017.

[9] Tomić T, Schneider DR. Energy Analysis of Waste and Energy System Integration. In: Ban M, editor. 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Dubrovnik 2017; Dubrovnik, Hrvatska, 4.-8.10.2017. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.

[10] Tomić T, Schneider DR. The Role of Energy from Waste in Closing the Loop Concept. In: Ban M, editor. 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Dubrovnik 2017; Dubrovnik, Hrvatska, 4.-8.10.2017. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.

[11] Tomić T, Dominković DF, Pfeifer A, Schneider DR. WtE power plant operation on the energy market under the influence of legislation changes. In: Ban M, editor. 2nd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SEE SDEWES Piran 2016; Piran, Slovenija, 15.-18.06.2016.. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[12] Tomić T, Schneider DR. Sustainability analysis of MSW management system through energy consumption and return approach. In: Ban M, editor. 2nd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SEE SDEWES Piran 2016; Piran, Slovenija, 15.-18.06.2016. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[13] Novosel T, Ban M, Duić N, Markovska N, Borozan V, Pukšec T, Tomić T, Krajačić G. Influence of district heating on future energy systems: Case study for the heat demand mapping and energy planning of the City of Osijek. In: Proceedings of 17th Symposium

on Thermal Science and Engineering of Serbia – SIMTERM 2015; Niš, Serbia, 20.-23.10.2015 : Niš: University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš; 2015.

[14] Tomić T, Ćosić B, Schneider DR. Economic viability of biomass and MSW-fuelled district heating system: case of the city of Zagreb. In: Ban M, editor. 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Dubrovnik 2015; Dubrovnik, Hrvatska, 27.09.-2.10.2015. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.

Cjelokupan popis radova dostupan na Hrvatskoj znanstvenoj bibliografiji: https://bib.irb.hr/lista-radova?autor=359003